

Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva

**Fluxo de Potência Ótimo em Redes de Distribuição de
Energia com a Presença de Geração Distribuída: Um
Novo Algoritmo para Auxiliar a Análise do Perfil de
Tensão**

**FLORIANÓPOLIS
2006**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Fluxo de Potência Ótimo em Redes de Distribuição de
Energia com a Presença de Geração Distribuída: Um
Novo Algoritmo para Auxiliar a Análise do Perfil de
Tensão**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva

Florianópolis, Setembro de 2006.

Fluxo de Potência Ótimo em Redes de Distribuição de Energia com a Presença de Geração Distribuída: Um Novo Algoritmo para Auxiliar a Análise do Perfil de Tensão

Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração *Sistemas de Potência*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.
Orientador

Nelson Sadowski, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D. (UFSC)
Presidente

Ana Barbara Knolseisen Sambaqui, D.Eng. (UDESC)

Katia Campos de Almeida, Ph.D. (UFSC)

Roberto de Souza Salgado, Ph.D. (UFSC)

*"Em momentos de crise, só a imaginação é mais importante que o conhecimento"Albert Einstein
(1879-1955)*

*"Se o conhecimento pode criar problemas, não e através da ignorância que podemos
solucioná-los"Issac Asimov (1920-1992)*

AGRADECIMENTOS

Na longa marcha, houve muitas pessoas que me ajudaram a definir meus rumos e a perceber a paisagem que se apresentava no caminho, ou que me incentivaram a continuar com mais ânimo.

Correndo o risco de omissão, desejo expressar minha gratidão a todas elas. Mas não posso deixar de lembrar de alguns companheiros de viagem:

O professor Hans Helmut Zürn, Ph.D., meu orientador de dissertação, pelas sugestões, críticas e estímulo

Aos meus professores de graduação da UCG, que me deram incentivo e apoio para fazer o mestrado.

Aos amigos e amigas do LABSPOT, LABPLAN, UCG e do ESCOTISMO, pela compreensão, paciência e incentivo;

A Deus que me deu força de vontade para seguir em frente mesmo nas horas de dificuldade e desânimo;

O meu coração será eternamente grato aos meus pais (**Abrão Lincoln Rodrigues da Cunha & Maria Fátima de Paiva Cunha**), as minhas irmãs (**Adalgiza Rodrigues da Cunha Paiva & Hosana Rodrigues da Cunha Paiva Carneiro**), a minha sobrinha (**Mariana Paiva Borges**) e aos meus cunhados (**Paulo Cristiano Garcia Borges & Wandeir Carneiro de Souza**), pela compreensão da minha ausência, pelo incentivo, pelo companheirismo e pelo amor.

A todos, muito obrigado.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Fluxo de Potência Ótimo em Redes de Distribuição de Energia com a Presença de Geração Distribuída: Um Novo Algoritmo para Auxiliar a Análise do Perfil de Tensão

Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva

Setembro/2006

Orientador: Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Palavras-chave: Geração distribuída, Sistemas de distribuição, Fluxo de Potência Ótimo

Número de Páginas: xvi + 91

O crescente aumento da demanda e os altos custos na construção de novas unidades geradoras, o esgotamento das grandes fontes primárias e os grandes problemas ambientais causados por estas construções fazem com que a Geração Distribuída esteja cada dia mais presente em nossos sistemas e conectadas à rede local, seja ela de distribuição, subtransmissão ou mesmo de transmissão.

Com a conexão destas fontes nas redes locais, tem-se a necessidade de se realizar diversos estudos referentes aos impactos que estas fontes podem causar nas redes.

Devido a esta necessidade foi pensada e proposta para esta dissertação a elaboração de uma ferramenta que fosse capaz de avaliar qual seria o impacto da entrada destas fontes de geração distribuída no perfil de tensão das redes.

Para realizar este estudo foi elaborado um algoritmo de Fluxo de Potência Ótimo via Método dos Pontos Interiores baseado no Método das Somas das Potências que fosse capaz de maximizar a geração de potência ativa das fontes de geração distribuída, levando em conta os limites máximos de tensão das normas da ANEEL para redes de distribuição, bem como o limite máximo de potência ativa das unidades de geração distribuída presentes em um alimentador de distribuição, analisando o impacto desta maximização sobre o perfil de tensão das redes.

Afim de ver a viabilidade deste algoritmo desenvolvido, o mesmo foi aplicado em três sistemas de distribuição, sendo dois sistemas testes e um sistema real da CELESC, e obteve resultados satisfatórios para todos estes sistemas.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

Optimal Load Flow in Distribution Networks with the Distributed Generation: A New Algorithm to Aid the Analysis of the Voltage Profile

Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva

September/2006

Advisor: Prof. Hans Helmut Zörn, Ph.D.

Area of Concentration: Power Systems

Key words: Distributed Generation, Distribution Networks, Optimal Power Flow

Number of Pages: xvi + 91

The constant increase of the electrical power systems demand and the high costs in the construction of new generation units, the exhaustion of the large primary sources and the large environmental problems caused by these constructions cause the Distributed Generation to be more present every day in many systems, being connected to the local distribution, sub-transmission or even transmission networks.

With the connection of these sources to the local networks, there appears the need of accomplishing several studies regarding the impacts that these sources can cause to the networks.

Due to this need, a computational tool is proposed in this dissertation that is capable to evaluate the impact of the connection of these distributed generation sources in the voltage profile of the network.

To accomplish this study, an algorithm of Optimum Power Flow by the Interior Points Method was elaborated based on the Method of Power Sums that is capable to maximize the generation of active power of the distributed generation sources taking into account the voltage limits according to the norms of ANEEL for distribution networks, as well as the maximum limit of active power of the units of distributed generation present in a distribution feeder.

To show the feasibility of the developed algorithm, it was applied to three distribution systems, being two of them test-systems and one, a real system of CELESC, with satisfactory results obtained for all these systems.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	A energia	1
1.2	Fontes de energia no Brasil	2
1.3	A energia elétrica no Brasil	3
1.4	Modelo do setor elétrico brasileiro	5
1.5	Objetivo geral	6
1.6	Estrutura do trabalho	6
2	Geração Distribuída	9
2.1	Introdução	9
2.2	Conceito de Geração Distribuída (GD)	9
2.3	Vantagens e desvantagens da GD	11
2.4	Tecnologias disponíveis	14
2.5	Categoria da tecnologia	16
2.5.1	Tecnologias de pequeno porte	16
2.5.2	Tecnologias de médio porte	19
2.6	Fontes com perspectivas de uso no Brasil	21
2.7	Grau de penetração da GD	22
2.8	Conclusão	22

3	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDE)	23
3.1	Introdução	23
3.2	Sistema de distribuição	24
3.2.1	Subestação	25
3.2.2	Redes primárias	25
3.2.3	Redes secundárias	28
3.2.4	Regulador de tensão	28
3.2.5	Banco de capacitores	29
3.3	Conclusão	29
4	Fluxo de Potência para Redes de Distribuição	30
4.1	Introdução	30
4.2	Método das somas das potências	31
4.2.1	Cálculo das potências acumuladas	32
4.2.2	Cálculo das potências acumuladas na presença de GD	33
4.2.3	Cálculo das perdas ativa e reativa	33
4.2.4	Cálculo das tensões	34
4.2.5	Cálculo dos ângulos das tensões	36
4.2.6	Equações para o cálculo de outros parâmetros do sistema	36
4.3	Fluxograma do método das somas das potências	37
4.4	Conclusão	38
5	Fluxo de Potência Ótimo (FPO) via Método dos Pontos Interiores	39
5.1	Introdução	39
5.2	Vantagens e desvantagens do FPO	40
5.3	Formulação geral do FPO	41
5.4	Métodos de Pontos Interiores (PI)	42
5.5	Fluxograma.	46
5.6	Conclusão	47

6	Descrição do Programa Desenvolvido	48
6.1	Introdução	48
6.2	Formulação do problema	49
6.3	Conclusão	53
7	Simulações e Resultados Obtidos	54
7.1	Introdução	54
7.2	Resultados do sistema teste de 17 nós	55
7.2.1	Resultado sem a presença da GD	55
7.2.2	Resultado com a presença da GD	57
7.2.3	Comparação dos gráficos sem GD e com GD	59
7.3	Resultados do sistema teste de 14 nós	62
7.3.1	Resultado sem a presença da GD	62
7.3.2	Resultado com a presença da GD	63
7.3.3	Comparação dos gráficos sem GD e com GD	65
7.4	Resultados do sistema real de 16 nós	67
7.4.1	Resultado sem a presença da GD	68
7.4.2	Resultado com a presença da GD	70
7.4.3	Comparação dos gráficos sem GD e com GD	74
7.5	Conclusão	77
8	Considerações Finais	78
8.1	Introdução	78
8.2	Conclusão	78
8.3	Sugestões para trabalhos futuros	79
A	Sistema teste de 17 nós	80
A.1	Dados do sistema	81

B	Sistema teste de 14 barras	83
B.1	Dados do sistema	83
C	Sistema Real de 16 nós	85
C.1	Dados do sistema	86
	Referências Bibliográficas	87

Lista de Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
AT	Alta Tensão.
BT	Baixa Tensão.
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
DE	Despacho Econômico.
DPCA	The Distributed Power Coalition of America
EPRI	Electric Power Research Institute
FPO	Fluxo de Potência Ótimo.
GD	Geração Distribuída.
IEEE	Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica.
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética.
KKT	Karush-Kuhn-Tucker.
kvar	Quilo volt amper reativo.
kW	Quilo Watts.
MME	Ministério de Minas e Energia.
PCH	Pequena Central Hidroelétrica.
PCT	Pequenas Centrais Termelétricas.
PI	Método dos Pontos Interiores.
PL	Programação Linear.
SDE	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

SEE Sistemas de Energia Elétrica

USADOE United States of America Department of Energy.

VTCD Variação de Tensão de Curta Duração.

VTLD Variação de Tensão de Longa Duração.

Lista de Figuras

1.1	Oferta interna de energia. Fonte (MME, 2006)	2
1.2	% da energia elétrica gerada pelas diferentes formas de energia primária. Fonte (ANEEL, 2006)	3
1.3	Nº de unidades geradoras pelas diferentes formas de energia primária. Fonte(ANEEL, 2006)	4
1.4	Composição setorial do consumo de eletricidade. Fonte (MME, 2006)	4
2.1	Modelo de geração distribuída. Fonte (LOPES, 2004)	11
2.2	Célula combustível do tipo PEMFC.	16
2.3	Microturbina a gás.	17
2.4	Motores de combustão interna. Fonte: (STEMAC, 2006)	18
2.5	Sistema com células fotovoltaicas.	19
2.6	Sistema de co-geração de energia a partir de um resíduo agrícola (bagaço)	20
2.7	Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH).	20
2.8	Sistema de geração de energia eólica.	21
3.1	Principais componentes de um sistema elétrico. Fonte (MORETO, 2005)	23
3.2	Sistema de distribuição. Fonte (COSER, 2006)	24
3.3	Principais componentes de uma subestação de distribuição.	25
3.4	Rede aérea com cabo nu.	26
3.5	Rede subterrânea.	26
3.6	Rede aérea compacta com cabo protegido.	27
3.7	Rede aérea com cabo isolado.	27

3.8	Regulador de tensão. Fonte (ITB, 2006)	28
3.9	Bando de capacitores. Fonte (LEYDEN, 2006)	29
4.1	Alimentador principal, N nós e N ramos.	31
4.2	Equivalente elétrico.	31
4.3	Fluxograma do método da soma das potências.	37
5.1	Fluxograma do FPO via método dos pontos interiores.	47
7.1	Sistema de 17 nós sem ramais laterais. Fonte (BARAN; WU, 1989)	55
7.2	Valor da tensão em pu nos nós. Fonte: Programa desenvolvido.	60
7.3	Valor do carregamento dos trechos em %. Fonte: Programa desenvolvido.	60
7.4	Valor e sentido da potência ativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.	61
7.5	Valor e sentido da potência reativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.	61
7.6	Sistema de 14 nós com ramais laterais. Fonte (BARAN; WU, 1989)	62
7.7	Valor da tensão em pu nos nós. Fonte: Programa desenvolvido.	65
7.8	Valor do carregamento dos trechos em %. Fonte: Programa desenvolvido.	66
7.9	Valor e sentido da potência ativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.	66
7.10	Valor e sentido da potência reativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.	67
7.11	Alimentador real. Fonte: (ARANHA NETO, 2006).	67
7.12	Alimentador real resumido para 16 nós. Fonte: (ARANHA NETO, 2006).	68
7.13	Valor da tensão em pu nos nós. Fonte: Programa desenvolvido.	74
7.14	Valor do carregamento dos trechos em %. Fonte: Programa desenvolvido.	75
7.15	Valor e sentido da potência ativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.	76
7.16	Valor e sentido da potência reativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.	77
A.1	Sistema de 32 nós. Fonte (BARAN; WU, 1989)	80
A.2	Sistema de 17 nós sem ramais laterais. Fonte (BARAN; WU, 1989)	80
B.1	Sistema de 14 nós sem ramais laterais. Fonte (DAS; KOTHARI; KALAM, 1995)	83
C.1	Alimentador real. Fonte: (ARANHA NETO, 2006).	85
C.2	Alimentador real resumido para 16 nós. Fonte: (ARANHA NETO, 2006).	86

Lista de Tabelas

2.1	Sumário do impacto de GD (causados, minimizados).	12
2.2	Tecnologias utilizadas em geração distribuída.	14
2.3	Tecnologias e características de fontes de GD.	15
2.4	Tendências mercadológicas.	15
7.1	Tensão nos nós.	55
7.2	Nós com tensão abaixo de 0.93pu.	56
7.3	Valor das potências.	56
7.4	Valor das correntes e perdas nos trechos.	57
7.5	Tensão nos nós.	58
7.6	Valor da potência gerada pela GD.	58
7.7	Valor das potências.	59
7.8	Valor das correntes e perdas nos trechos.	59
7.9	Tensão nos nós.	62
7.10	Valor das potências.	63
7.11	Valor das correntes e perdas dos trechos.	63
7.12	Tensão nos nós.	64
7.13	Valor da potência gerada pela GD.	64
7.14	Valor das Potências.	64
7.15	Valor das correntes e perdas dos trechos.	65
7.16	Tensão nos nós.	68

7.17 Nós com tensão abaixo de 0,93pu.	69
7.18 Valor das correntes e perdas das linhas.	69
7.19 Valor das potências.	70
7.20 Tensão nos nós.	70
7.21 Valor da potência gerada pela GD.	71
7.22 Valor das potências.	71
7.23 Valor das correntes e perdas nos trechos.	71
7.24 Tensão nos nós.	72
7.25 Valor das potências geradas pela GD.	72
7.26 Valor das potências.	72
7.27 Valor das correntes e perdas nos trechos.	73
A.1 Dados do alimentador de 17 nó sem ramais laterais.	81
A.2 Dados do alimentador de 17 nó sem ramais laterais.	81
A.3 Dados do alimentador de 17 nó sem ramais laterais.	82
B.1 Dados do alimentador de 17 nós sem ramais laterais.	84
B.2 Dados do alimentador de 17 nós sem ramais laterais.	84
B.3 Dados do alimentador de 17 nós sem ramais laterais.	84
C.1 Dados do alimentador real de 16 nós com ramais laterais.	86

Capítulo 1

Introdução

1.1 A energia

Todo ser vivo precisa de energia para a sua existência, desde a forma mais simples de energia (que é aquela adquirida através do alimento ingerido) até a forma de energia que ele utiliza para realizar os diversos tipos de trabalhos do dia a dia.

O desenvolvimento da humanidade está ligado diretamente ao aprendizado do uso das diversas formas de energia. O aprendizado mais importante do uso das formas de energia foi referente ao domínio do fogo pelo homem, que no início usava o fogo para cozinhar seus alimentos, se aquecer e iluminar os ambientes.

Num estágio mais avançado de desenvolvimento, o homem começou a usar o fogo para realizar trabalhos com metais e assim o homem tem se preocupado em aprender cada vez mais a lidar com os diferentes tipos de energia, tanto para aquecimento, iluminação, transporte e outras utilidades da energia (CAMPOS, 2004).

A energia se manifesta de diversas formas na natureza. As manifestações mais comuns na natureza são: energia solar, cinética, potencial, eólica, das marés, geotérmica e outras (estas formas de energia são consideradas primárias) que podem ser transformadas em outras formas de energia através da primeira lei da termodinâmica apresentada na equação 1.1, a qual diz que a energia interna de um sistema é relacionada ao trabalho realizado sobre o ambiente e ao calor transferido ao sistema.

$$\Delta U = Q - W \quad (1.1)$$

Quando estas formas de energia são transformadas pelo homem, através do uso ou não de alguma máquina, estas se transformam em outro tipo de energia. Esta nova forma de energia passa a ser chamada de energia secundária.

Atualmente a energia elétrica é considerada a energia mais nobre entre as energias secundárias, pois é quase impossível imaginar a vida sem a presença desta energia.

A grande mudança no tipo da vida da população mundial como um todo se dá em grande parte graças ao uso da energia elétrica, pois a partir da utilização desta fonte de energia, a população como um todo teve um grande aumento na qualidade de vida.

As principais fontes primárias que são utilizadas para a geração de energia elétrica são: hidráulicas, derivados de petróleo, carvão mineral ou vegetal, nucleares e gás natural.

1.2 Fontes de energia no Brasil

No Brasil há diversas fontes de energia que são utilizadas pela população todos os dias em diferentes tipos de trabalhos para diferentes finalidades. A figura 1.1 nos mostra as principais fontes de energia que são utilizadas no Brasil desde 1940 até 2004.

Através da figura 1.1 pode-se observar também a mudança no perfil do tipo da matriz energética utilizada nacionalmente.

Na década de 40 a principal fonte de energia brasileira era a lenha com 83% de representatividade na matriz energética nacional. Nos dias atuais a lenha não é mais tão representativa como antigamente, atingindo apenas 13%, sendo hoje os derivados de petróleo a principal fonte de energia com 48% de representatividade na matriz energética nacional segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) (MME, 2006).

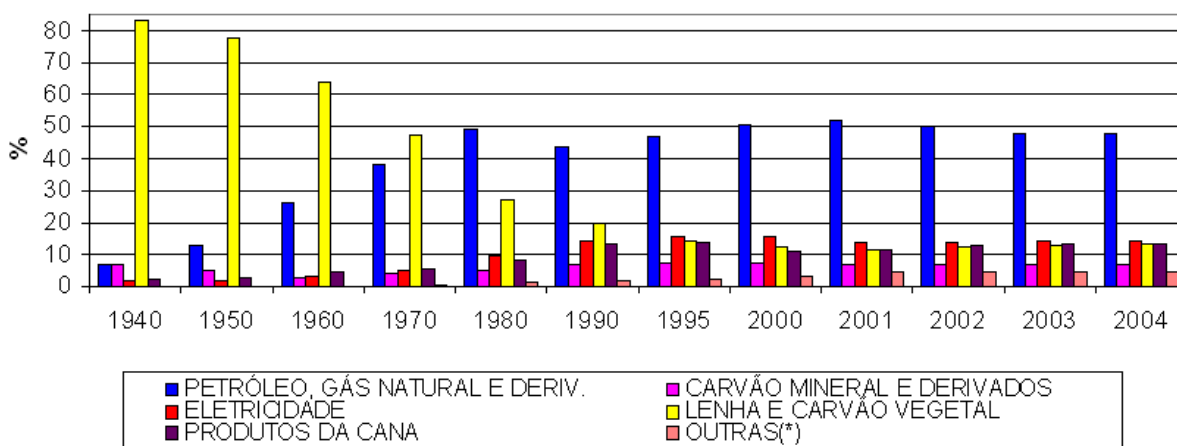


Figura 1.1: Oferta interna de energia. Fonte (MME, 2006)

Também na figura 1.1 é possível verificar o desenvolvimento da energia elétrica, que na década de 40 representava apenas 1% hoje representa 14% da matriz energética brasileira.

1.3 A energia elétrica no Brasil

A energia elétrica brasileira é, em sua maior parte proveniente de fontes de energia cinética e potencial contidas na água, conhecida como fonte de energia hidráulica.

A figura 1.2 mostra as fontes primárias brasileiras de geração de energia elétrica, onde é possível ver que a geração atual se baseia principalmente na fonte de energia hidráulica, com aproximadamente 76%.

Em nenhum outro lugar do mundo se encontra matriz energética similar. A figura 1.2 também demonstra quão grande é a dependência do Brasil em relação ao insumo água.

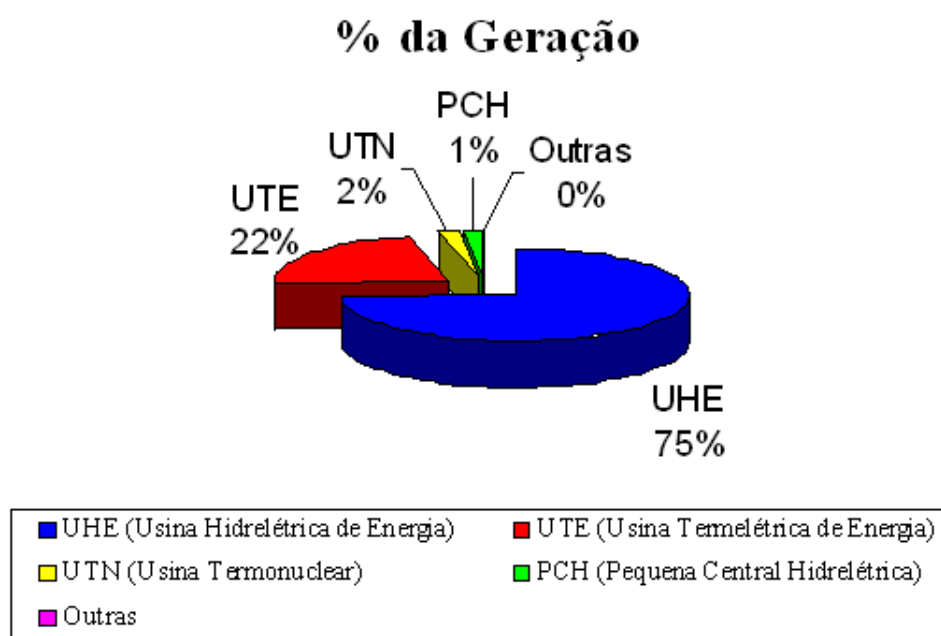


Figura 1.2: % da energia elétrica gerada pelas diferentes formas de energia primária. Fonte (ANEEL, 2006)

O Brasil possui um total 1504 empreendimentos em operação, gerando 93,6 GW de potência. Está prevista para os próximos anos uma adição de 27,8 GW na capacidade de geração do País, proveniente dos 73 empreendimentos atualmente em construção e mais 518 outorgadas (ANEEL, 2006).

Na figura 1.3 é possível ver a quantidade de unidades geradoras que se destinam as principais fontes de geração de energia elétrica.

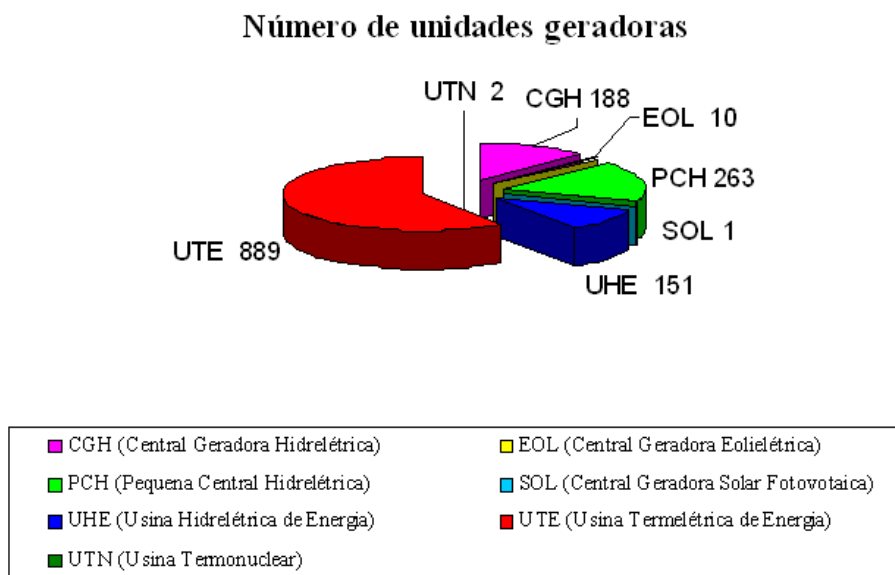


Figura 1.3: N° de unidades geradoras pelas diferentes formas de energia primária. Fonte(ANEEL, 2006)

Outro dado relevante que deve ser levado em consideração é onde esta energia está sendo consumida. A figura 1.4 apresenta um panorama de como é gasta a energia elétrica no Brasil em suas diversas áreas (residenciais, comerciais, públicas, agropecuárias, transportes e industriais) desde 1970 até o ano de 2004.

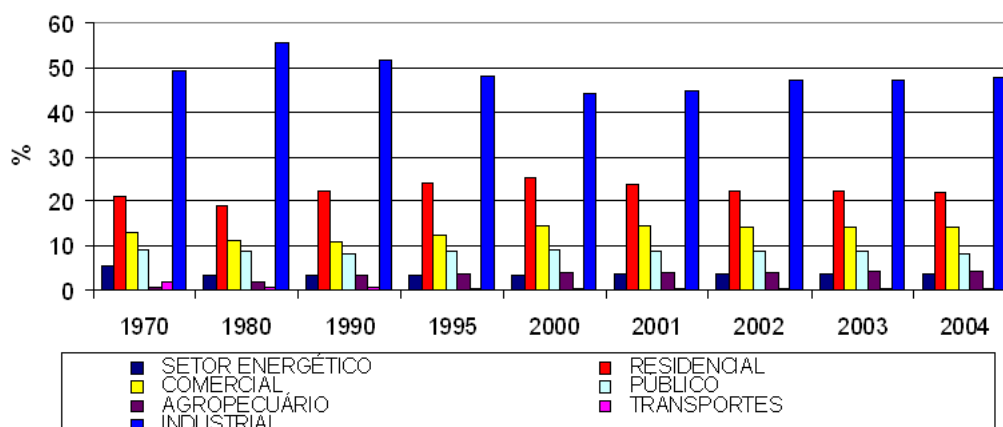


Figura 1.4: Composição setorial do consumo de eletricidade. Fonte (MME, 2006)

1.4 Modelo do setor elétrico brasileiro

O modelo de geração de energia elétrica que é predominante no Brasil hoje é o modelo centralizado, onde a concepção deste modelo é baseada em unidades geradoras de grande porte (tipicamente hidrelétricas ou termoeletricas), instaladas onde se têm os melhores e mais vantajosos aproveitamentos das fontes primárias de energia (geralmente longe dos grandes centros consumidores) e ligadas aos centros consumidores através de extensas linhas de transmissão.

De acordo com Spier et al. (2001) este modelo foi projetado para prover economia, segurança, confiabilidade e qualidade no suprimento da carga onde o despacho é centralizado. Neste modelo as redes de distribuição são radiais e com fluxo de potência em apenas uma direção.

Para Romagnoli (2005), nos sistemas centralizados as linhas de transmissão sobrecarregadas e linhas antigas fazem com que o sistema fique mais propício a contingências. Caso seja necessária a expansão do sistema de transmissão para aliviar as linhas sobrecarregadas ou modernização das mesmas para atender às exigências da carga, a solução sempre trará problemas ambientais ou sociais associados.

Os altos custos na construção de novas unidades geradoras, o esgotamento das grandes fontes primárias e os grandes problemas ambientais causados por estas construções tornam as mesmas cada vez mais difíceis de serem implementadas.

Isso faz com que a Geração Distribuída (GD) seja uma opção plausível, pois é um novo conceito de operação, onde pequenas unidades geradoras são conectadas à rede local, seja ela de distribuição, subtransmissão ou mesmo de transmissão. Este sistema aproxima os produtores de energia aos centros consumidores, reduzindo assim as perdas na transmissão (GOMES et al., 1999).

Além disso, permite uma maior diversificação das tecnologias empregadas para a produção de energia elétrica. Com isso, para a escolha da fonte de geração pode ser levada em conta o tipo de carga que a mesma irá alimentar ou o tipo de recurso energético que o local pode oferecer (RODRÍGUEZ, 2002).

A cada dia é mais comum ouvir falar sobre a utilização de fontes de geração distribuída para atender ao aumento da demanda energética a partir de fontes renováveis de energia. De acordo com Ackermann, Andersson e Söder (2001), até o ano de 2010, 25% de toda potência instalada no mundo será provida de fontes de geração distribuída.

Um fato que tem contribuído muito para o aumento da geração distribuída são os avanços tecnológicos que vêm sendo alcançados na produção de energia elétrica a partir de diferentes formas, tais como: energia solar, energia eólica, biomassa, células combustíveis, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), combustíveis renováveis e outras.

A utilização da geração distribuída no Brasil teve seu aumento a partir do ano de 1995 com a abertura do setor energético brasileiro, através da promulgação da lei nº 8987 de 13/02/1995, na qual as concessões e permissões de serviços públicos passaram a ser outorgadas através de licitações públicas.

A geração distribuída contribui para o reforço do sistema e redução das perdas em redes longas e fracas. O comportamento dos geradores integrados a estes alimentadores longos é similar ao dos sistemas de geração isolada em redes fracas, e estão sujeitos aos mesmos fenômenos de limitação na capacidade da potência a ser transmitida e variação de tensão e frequência, diante das alterações nas condições da geração e da carga a ser atendida (NUNES, 2003).

Quando se faz a instalação de um gerador em um sistema, seja de distribuição, subtransmissão ou transmissão, este gerador irá mudar algumas das características da rede, mas há a necessidade de assegurar os requisitos mínimos que são: tensão estável, ausência de perturbações e a maior disponibilidade possível para o consumidor (CHABU; CARDOSO, 2001). Por isso a idéia de se estudar a melhor forma de instalação e operação de uma fonte de GD.

1.5 Objetivo geral

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo desenvolver um aplicativo de fluxo de potência ótimo via método dos pontos interiores para redes de distribuição na presença de geração distribuída, baseada na metodologia da soma das potências.

Dentre as inúmeras funções objetivo possíveis que podem ser levantadas para redes de distribuição com a presença de GD, será escolhida para esta dissertação apenas a maximização da potência ativa gerada pelas unidades de GD presentes ao longo de alimentadores de distribuição, permitindo com isso avaliar o potencial de GD capaz de satisfazer as restrições aplicadas ao problema.

A aplicabilidade desta ferramenta é principalmente em estudos de acesso à rede, podendo no entanto também ser usada pra avaliação da operação.

Além da função mencionada acima, pode-se incorporar outras funções ao problema como por exemplo a que permite obter a melhor injeção/absorção de potência reativa.

Além das restrições de canalização das tensões nos pontos notáveis da rede, pode-se incorporar restrições de fluxo, restrições de taps dos reguladores, entre outras.

1.6 Estrutura do trabalho

Esta dissertação foi estruturada da seguinte forma:

Capítulo 2. Neste capítulo são apresentados os principais conceitos, definições e características, referentes as diversas formas de geração distribuída presentes hoje no mundo, bem como as vantagens e desvantagens de sua utilização.

Também são apresentadas algumas das tecnologias disponíveis referentes as diversas formas de GD, bem como a definição destas tecnologias devido a sua categoria, se ela é de pequeno porte ou de médio porte, bem como as perspectivas da utilização destas diversas formas de GD no Brasil e os cálculos utilizados para analisar o grau de penetração que estas diversas formas de GD podem apresentar.

Capítulo 3. Neste capítulo são abordados os sistemas de energia elétrica desde a sua geração até seu consumo final, dando uma maior ênfase nos sistemas de distribuição apresentando os seus componentes, suas aplicações e finalidades.

Capítulo 4. Neste capítulo apresenta-se uma introdução sobre alguns dos tipos de métodos de cálculos utilizados para resolver o problema de fluxo de potência em redes de distribuição.

É dada uma maior relevância no método das somas das potências, devido ser este um dos métodos mais robustos, e que serviu de base para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

Na descrição do método das somas das potências, são apresentadas todas as equações referentes a este método, bem como o seu fluxograma.

Capítulo 5. Neste capítulo será apresentada uma introdução sobre Fluxo de Potência Ótimo (FPO), bem como as vantagens de se utilizar este método de cálculo para se resolver problemas de sistemas de potência. Detalha-se a metodologia de solução por pontos interiores. Também será apresentada uma formulação padrão para um problema de FPO.

Capítulo 6. Será apresentado neste capítulo o programa desenvolvido que consiste em maximizar o despacho de potência ativa em redes de distribuição de energia com a presença de fontes de GD levando em conta os perfis de tensão da rede, sendo apresentada toda a formulação matemática utilizada para desenvolver este programa, bem como o seu fluxograma.

Capítulo 7. Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com o programa desenvolvido em MATLAB para esta dissertação de mestrado, quando aplicados aos seguintes casos:

- Sistema teste de 17 barras;
- Sistema teste de 14 barras;
- Sistema real de 16 barras;

Para melhor compreensão dos resultados obtidos nos sistemas analisados, são primeiramente apresentados os resultados do alimentador sem a presença da GD, após são apresentados os resultados com presença da GD e por último é apresentada uma comparação entre os perfis de tensão ao longo do alimentador.

Capítulo 8. Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes à metodologia utilizada para esta dissertação de mestrado, bem como o programa desenvolvido e os valores obtidos com o programa.

Também são apresentadas as dificuldades encontradas durante a execução desta dissertação de mestrado, bem como as vantagens e desvantagens que são pertinentes a utilização desta metodologia utilizada.

E finalmente são apresentadas algumas idéias para trabalhos futuros a serem realizados nesta mesma linha de pesquisa.

Capítulo 2

Geração Distribuída

2.1 Introdução

Como mencionado no capítulo 1, devido ao constante crescimento da carga e os altos custos financeiros e ambientais de implantação de novas centrais elétricas de grande porte, surgiu como solução a construção de inúmeras pequenas unidades geradoras que se valem de diferentes fontes primárias de energia e que são coletivamente conhecidas por geração distribuída.

2.2 Conceito de Geração Distribuída (GD)

É complicado acharmos uma única definição que seja aceitável para a geração distribuída, pois cada pessoa, cada empresa, cada país pode ter uma definição em função da sua capacidade de produção de energia elétrica (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001).

Para Knorr, Spier e Lemos (2002) a geração distribuída pode ser diferentemente definida como geração dispersa para a América do Norte, geração descentralizada para a Europa e geração embutida para os países anglo-saxônicos.

De acordo com Marin (2004), o Electric Power Research Institute (EPRI) define GD como sendo geradores com poucos kW até 50 MW de capacidade instalada, e a Natural Gas Foundation define a GD como sendo geradores tipicamente entre 25 kW e 25 MW.

Já o trabalho apresentado por College, Ferreira e Medeiros (2005) nos mostra a definição de algumas instituições referentes a GD:

- Para o CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Électriques), a GD são unidades de geração com capacidade máxima de 50 a 100 MW, que geralmente são conectadas à rede de distribuição e que não têm seu despacho centralizado.

- Para o Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica (IEEE), é uma unidade de geração com instalações suficientemente pequenas em relação às grandes centrais de geração permitindo sua conexão em um ponto próximo à rede elétrica existente, junto aos centros de carga. Para o INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética) a GD é a geração elétrica produzida próxima a carga.

Segundo Silva et al. (2003) é a geração de energia por meio de pequenas unidades modulares situadas próximas aos locais de consumo. Seguindo a mesma linha de pensamento Brown et al. (2001), Gomes et al. (1999), Barker e Mello (2000), Knorr, Spier e Lemos (2002) definem como sendo pequenos geradores aqueles com capacidade menor do que 10 MW, ligados diretamente ao sistema de distribuição.

Para Burani et al. (2004) a GD é a geração elétrica junto ou próximo dos consumidores, podendo ser em sistemas isolados ou conectados a redes, com potências iguais ou inferiores a 30 MW.

A GD também pode ser definida segundo Rodríguez (2002) como sendo o uso integrado ou modular de recursos de unidades de pequeno porte pelas concessionárias de energia, pelos próprios consumidores ou por terceiros (produtores independentes), que pode vir a beneficiar um consumidor específico, um grupo de consumidores ou o sistema elétrico.

De acordo com Paulillo et al. (2004) a GD tem a característica de não ser despachada e ser de pequeno porte quando sua potência é comparada aos demais tipos de centrais de geração de energia elétrica existentes.

Para a DPCA (The Distributed Power Coalition of America) a GD é definida como sendo qualquer tecnologia de geração em pequena escala que fornece energia elétrica em um local próximo ao consumidor ou ao sistema de transmissão ou a distribuição da concessionária. (DPCA, 2006)

A GD é definida pela legislação do setor elétrico brasileiro através do decreto nº5.163 de 30 de julho de 2004 pelo Art. 14 como sendo:

"Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei nº 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador."

Para o autor desta dissertação GD são unidades geradoras de energia elétrica de capacidade igual ou inferior a 10 MW de potência podendo operar de forma isolada ou ligados à rede de distribuição, subtransmissão ou transmissão, próximo aos centros consumidores de energia.

A figura 2.1 apresenta um esquema de como seria um sistema no qual se tem diferentes formas de geração, em diversos lugares.

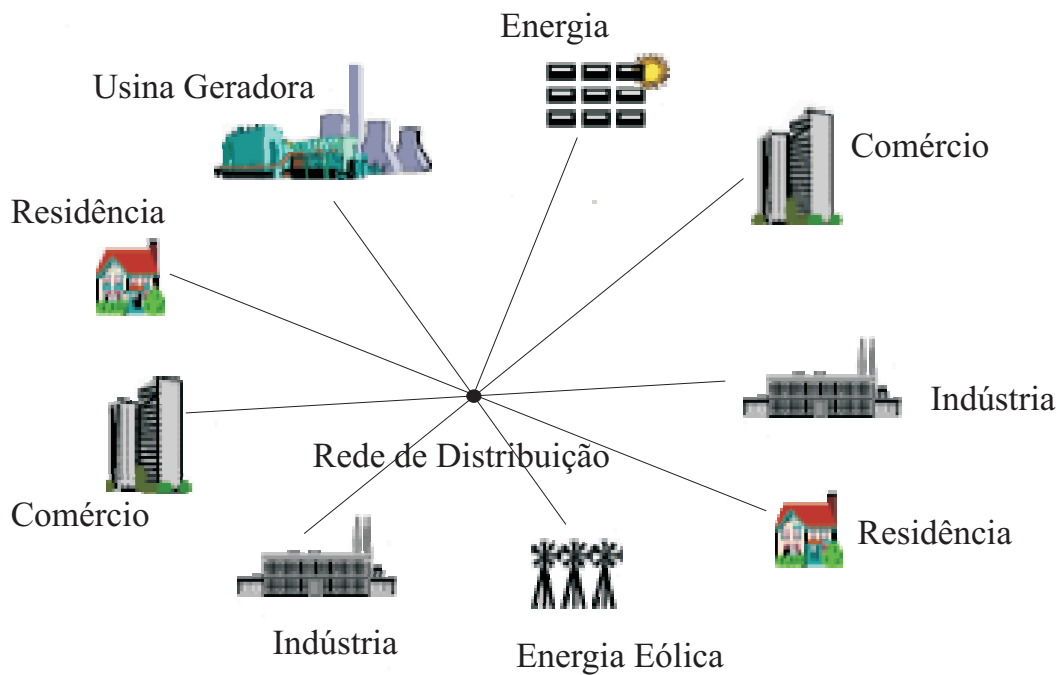


Figura 2.1: Modelo de geração distribuída. Fonte (LOPES, 2004)

2.3 Vantagens e desvantagens da GD

A utilização da GD em sistemas elétricos traz inúmeros desafios, Barker e Mello (2000) define estes desafios em quatro categorias:

1. A interface com o sistema;
2. Os aspectos de controle e proteção;
3. Os procedimentos operacionais e
4. Os problemas de projeto e planejamento.

Ribeiro, Ferreira e Medeiros (2005) apresentam na tabela 2.1 alguns problemas que podem ocorrer no sistema, bem como as soluções que podem ser adquiridas com a inclusão da GD no sistema como um todo.

Tabela 2.1: Sumário do impacto de GD (causados, minimizados).

Parâmetro (Qualidade)	Causadas por GD	Minimizadas por GD
VTLD*	Subtensão causada por interação de GD com equipamentos de regulação existente	GD pode contribuir com suporte de tensão
VTCD**		Exemplo da AMD que solucionou problemas de SAG com uso de cogeração
Harmônicos	GD com interface baseada em eletrônica de potência	
Variação de frequência	GD com geração intermitente	
Flicker	Requisitos adequados e avaliação da necessidade de reserva girante	
Desequilíbrio entre fases	Conexão de GD monofásicos	
Interrupções momentâneas		Células combustíveis

(*) Variação de tensão de longa duração (**) Variação de tensão de curta duração

Fonte (RIBEIRO; FERREIRA; MEDEIROS, 2005)

Para enumerar melhor as vantagens e desvantagens da utilização da GD foram destacados os seguintes itens:

- **Vantagens no uso da GD**

A utilização da GD nos sistemas de distribuição apresentam vantagem para o sistema, Spier, Lemos e Rosa (2001) definem como sendo vantagens para o sistema o suporte de tensão, melhoria na qualidade do suprimento, redução nas perdas, melhoria no fator de potência e possibilidade de ilhamento.

Para Camilo, Cebrian e Kagan (2005) as vantagens na utilização da GD são a produção de potência próxima de onde ela é consumida, a redução global das perdas e possível redução da necessidade de novas linhas de transmissão e de distribuição.

Segundo Marin (2004) uma das principais vantagens da GD é a de que ela esta localizada próxima às cargas consumidoras diminuindo assim a necessidade de T&D ¹.

Ribeiro, Ferreira e Medeiros (2005) apresentam como vantagens a flexibilidade de implantação em curto espaço de tempo para implementação quando comparado às grandes centrais, operação nos horários de ponta, para diminuir a flutuação dos preços, benefícios ambientais quando utilizam resíduos que iriam agredir o meio ambiente (biomassa) ou quando utilizam fontes de energia renováveis (eólica, solar).

Quanto ao sistema a GD pode reduzir as perdas já que atende a carga localmente, resultando em um aumento de confiabilidade no atendimento a carga devido a sistema de geração pronta para injetar excedentes na rede ou substituir a ausência de energia.

¹Transmissão e Distribuição

Segundo Daly e Morrison (2001) a GD pode aumentar a confiabilidade do sistema, reduzir os impactos ambientais e reduzir os custos com as redes de distribuição.

Quanto à localização adequada da GD pode se destacar as seguintes vantagens: redução do carregamento da rede e conseqüentemente maior flexibilidade operativa; melhor perfil de tensão e redução das perdas (GOMES et al., 1999).

Para Diniz, Carvalho e Barros (2004) as principais vantagens em se utilizar a GD são: redução dos custos das novas tecnologias; crescimento da demanda de energia; diminuição nos impactos ambientais; redução das perdas da energia no sistema; aproveitamento de resíduos; aproveitamento das fontes primárias regionais; diversificação da matriz energética; geração no local do consumo diminuindo as perdas; possibilidade de gerar energia através de cogeração (produzindo energia elétrica junto com energia térmica (calor ou frio)); redução de investimentos em transmissão e distribuição de energia (T&D); atendimento a regiões remotas ou isoladas; redução de custos principalmente nos horários de ponta e oportunidade de diversificação de negócios e ampliação de mercado.

- **Desvantagens no uso da GD**

A utilização da GD nos sistemas de distribuição também apresentam desvantagens para o sistema. Camilo, Cebrian e Kagan (2005) apresentam como desvantagem da GD a maior complexidade no nível de operação do despacho central, bem como os procedimentos de proteção operação e controle da rede de distribuição.

Para Ribeiro, Ferreira e Medeiros (2005) a GD pode deteriorar a energia elétrica devido a sub-tensões causadas por interação com equipamentos de regulação existentes; harmônicos quando a GD tem interface baseada em eletrônica de potência; variações na frequência quando há gerações intermitentes; o aparecimento de flicker (flutuação de tensão); conexão e desconexão de geradores de indução e desequilíbrio entre as fases quando se faz uma conexão de GD monofásica.

Spier, Lemos e Rosa (2001) apresentam algumas questões que são críticas com a conexão da geração distribuída tais como: aumento no nível de curto-circuito, flicker, flutuação de potência ativa (devido à disponibilidade da fonte primária (vento, sol, etc)), coordenação da proteção, competição por regulação de tensão e harmônicos.

Segundo Diniz, Carvalho e Barros (2004) a GD apresenta as seguintes desvantagens: altos custos das tecnologias de GD; maior complexidade de operação do sistema elétrico; questões técnicas relacionadas com qualidade da energia, curto-circuito, operação e manutenção, interconexão, operação sem carga; custos de interconexão elevados e maior complexidade nas interligações e no planejamento integrado.

2.4 Tecnologias disponíveis

A Geração Distribuída, não está associada a uma única fonte de energia primária ou a uma única tecnologia. Dentre as tecnologias utilizadas na GD, destacam-se vários tipos de tecnologias. Diniz, Carvalho e Barros (2004) destacam as seguintes tecnologias: células combustíveis, eólicas, microturbinas a gás, motores Stirling, motores de combustão interna com baixa emissão, painéis fotovoltaicos, PCH's, térmicas solares e cogeração.

Na tabela 2.2 são apresentadas as tecnologias que Ackermann, Andersson e Söder (2001) destacam para serem utilizadas na GD, bem como o tamanho típico expresso em watts (W) das mesmas unidades de potência.

Tabela 2.2: Tecnologias utilizadas em geração distribuída.

Tecnologia	Tamanho típico disponível por módulo
Não renováveis	
Turbina de gás de ciclo combinado	35 - 400 MW
Motores de combustão interna	5 kW - 10 MW
Turbina de combustão	1 - 250 MW
Microturbinas	35 kW - 1 MW
Renováveis	
Hidro pequena	1 - 100 MW
Hidro micro	25 kW - 1 MW
Turbina eólica	200 Watts - 3 MW
Sistema fotovoltaico	20 Watts - 100 kW
Térmica solar, receptor central	1 - 10 MW
Térmica solar, sistema Lutz	10 - 80 mw
Biomassa, baseada na gaseificação	100 kW - 20 MW
PAFC(*)	200 kW - 2 MW
MCFC(*)	250 kW - 2 MW
PEFC(*)	1kW - 250 kW
SPFC(*)	250 kW - 5 MW
Geotérmica	5 - 100 MW
Energia oceânica	100 kW- 1 MW
Motor ciclo <i>Stirling</i>	2 - 10 kW

(*) FC referente a *Fuell cells* ou célula combustível

Fonte (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001)

As tecnologias apresentadas na tabela 2.2, têm as seguintes características: modularidade, baixo tempo para instalação, operação em conexão com a rede. Algumas destas tecnologias ainda permitem a produção de calor ao mesmo tempo (SILVA et al., 2003).

Já a tabela 2.3 apresenta as tecnologias apresentadas por College, Ferreira e Medeiros (2005) bem como algumas características referentes as mesmas e o custo estimado (em euros) para cada kW instalado.

Tabela 2.3: Tecnologias e características de fontes de GD.

Tecnologias	Características	Custo por kW instalado (euros)
PCH	Aproveitamento de pequenos cursos de água	600 a 800**
Diesel	Geralmente utilizadas para pequenas unidades de centenas de kW	1000-2500
Turbina a Gás	Para grandes termelétricas de dezenas de MW	1000-1250
Célula Combustível	Existem poucos fornecedores comerciais	4500-20000 (ou mais)
Biomassa	Grande potencial de aplicação no Brasil	400-600**
Fotovoltaico	Fator de capacidade de 10 a 15% na Europa	5000-7000
Eólica	É a geração que mais cresce em utilização no mundo	800-1000 2000

** Referentes a instalações no Brasil

Fonte (COLLEGE; FERREIRA; MEDEIROS, 2005)

Diniz, Carvalho e Barros (2004) apresentam na tabela 2.4, o resultado de um estudo realizado pela CEMIG em conjunto com a USADOE referente as principais tendências para as tecnologias de GD.

Tabela 2.4: Tendências mercadológicas.

Tecnologia	Mercado alvo							Potências Típicas
	Resid.	Comer.	Ind.	Rural remoto	Conectado à rede	Portatil / eletroele.	Trans.	
Células a combustível de baixa temperatura	P	P	S	S	S	S	P	1 kW a 250 kW
Células a combustível de alta temperatura	S	P	P	S	P	-	S	1 kW a 3 MW
Microturbinas a gás	S	P	P	S	P	-	S	25 kW a 300 kW
Motores Stirling	P	P	S	P	P	-	S	1 kW a 150 kW
Motores de combustão interna	S	P	P	P	P	-	P	1 kW a 50kW
Sistemas híbridos células e microturbinas	-	S	P	S	P	-	-	250 kW a 20 MW
Painéis fotovoltaicos	P	-	-	P	-	P	-	1 W a 1 kW
Pequenas centrais termoeletricas	-	-	P	S	P	-	-	1 MW a 30 MW
Pequenas centrais hidrelétricas	-	-	P	S	P	-	-	1 MW a 30 MW
Usinas eólio-elétricas	-	-	S	S	P	-	-	1 MW a 20 MW

P=mercado primário S=mercado secundário

Fonte (DINIZ; CARVALHO; BARROS, 2004)

2.5 Categoria da tecnologia

A GD pode ser dividida em duas categorias, as de pequeno porte e as de médio porte. As de pequeno porte são as voltadas para aplicações locais individuais, com a denominação de geração de micropotência, e as de médio porte são as voltadas para aplicações individuais ou de poucos consumidores. Uma determinada tecnologia pode ser utilizada tanto em uma como em outra categoria, dependendo exclusivamente de seu tamanho e de sua aplicação (DINIZ; CARVALHO; BARROS, 2004).

2.5.1 Tecnologias de pequeno porte

São consideradas por Diniz, Carvalho e Barros (2004) como tecnologias de pequeno porte as apresentadas a seguir, estando operando de forma individual ou em sistemas híbridos:

2.5.1.1 Célula combustível

As células combustíveis transformam a energia química dos combustíveis diretamente em energia elétrica, bem como subproduto a água e o calor, utiliza como fonte de combustível o hidrogênio (como pode ser visto na figura 2.2) e tem elevada eficiência para unidades de qualquer tamanho. As principais células em estudo são:

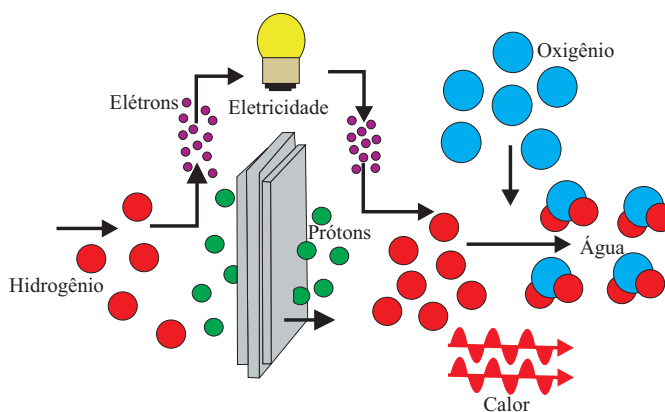


Figura 2.2: Célula combustível do tipo PEMFC.

Polímero condutor iônico (PEMFC, *proton exchange membrane fuel cell*) apresenta rendimento em torno de 40% a 50%. Têm sido desenvolvidas com potências variando de 1 W a 250 kW.

Alcalinas (AFC, *alkali fuel cell*) apresenta rendimento em torno de 70%. Têm sido desenvolvidas com potências variando de 300 W a 3 kW.

Ácido fosfórico (PAFC, *phosphoric acid fuel cell*) apresenta rendimento em torno de 40% a 80% têm sido desenvolvidas com potências da ordem de 200 kW com projetos em desenvolvimento para células de 11 MW.

Carbono fundido (MCFC, *molten carbonate fuel cell*) apresenta rendimento em torno de 60% a 80%. Têm sido desenvolvidas com potências variando de 200 kW a 2 MW. Há projetos em desenvolvimento para células de 100 MW.

Óxido sólido (SOFC, *solid oxide fuel cell*) apresenta rendimento em torno de 60%. Têm sido desenvolvidas com potências até 200 kW

2.5.1.2 Microturbina a gás

São sistemas compactos de geração térmica (pequenas turbinas), podendo operar isoladamente ou em paralelo com o sistema. São equipamentos de alta confiabilidade, baixo ruído, baixas vibrações e menor número de paradas para manutenção. Um exemplo deste sistema é apresentado na figura 2.3.

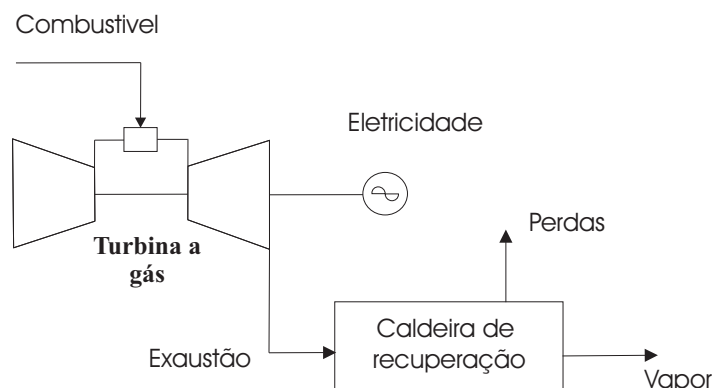


Figura 2.3: Microturbina a gás.

É uma tecnologia dominada por diversos fabricantes, estando disponíveis na faixa de 25 a 500 KW e podem ter como combustível o gás natural ou combustíveis líquidos. A composição do gás natural é basicamente de hidrocarbonetos leves (metano), com isso em termos ambientais tem-se uma queima mais limpa reduzindo a emissão de poluentes (BURANI et al., 2004).

2.5.1.3 Motores de combustão interna

O grande domínio desta tecnologia, vem fazendo com que os preços caiam com o aumento da participação no mercado. É uma tecnologia que vem sendo muito utilizada para:

- *Back-up*;
- Manter cargas em horários de pico;
- Co-geração (usando gás natural e/ou gases pobres, como os do lixo),
- Sistemas de pequeno porte ou isolados;
- Outros.

Podem ter como combustível tanto o diesel como o gás natural. Tendo como pontos negativos o alto índice de ruídos e emissão de poluentes. A figura 2.4 apresenta o desenho de um grupo gerador com motor de combustão interna.

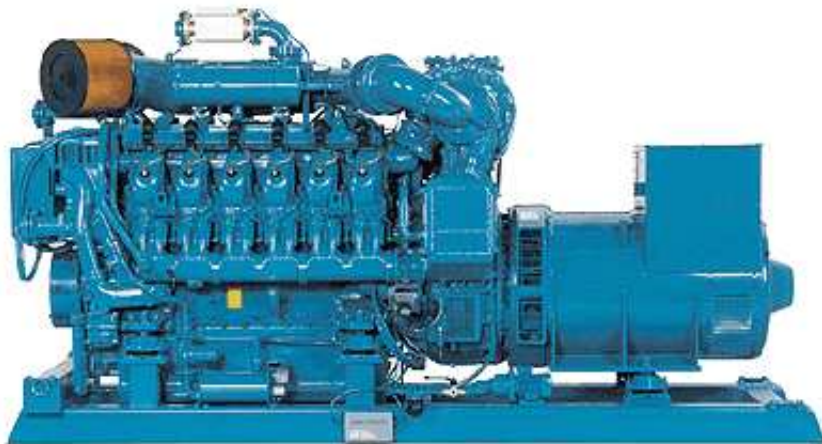


Figura 2.4: Motores de combustão interna. Fonte: (STEMAC, 2006)

2.5.1.4 Células fotovoltaicas

O seu emprego ocorre de maneira efetiva em localidades isoladas e de difícil acesso (BURANI et al., 2004). Apresentam as seguintes vantagens: modularidade, confiabilidade, simplicidade, versatilidade, curto prazo de instalação, fácil manutenção, ausência de restrições ambientais, legislação favorável e a inexistência de custo com o combustível.

Apresentam as seguintes desvantagens: alto custo de implantação, necessidade de extensas áreas para instalação das células, baixo fator de rendimento e de capacidade e a necessidade de um sistema de suporte na sua maioria das vezes bancos de bateria para períodos de baixa ou nula insolação (DINIZ; CARVALHO; BARROS, 2004; BURANI et al., 2004).



Figura 2.5: Sistema com células fotovoltaicas.

A figura 2.5 apresenta um esquema de um sistema com células fotovoltaicas,

- | | | |
|-------------------------|------------------------------|------------------------|
| 1. Gerador Fotovoltaico | 2. Cabos de ligação | 3. Interruptor DC |
| 4. Inversor | 5. Contador de energia solar | 6. Contador de consumo |
| 7. Caixa de ligação | | |

2.5.2 Tecnologias de médio porte

As tecnologias que Diniz, Carvalho e Barros (2004) definem como sendo de médio porte são:

2.5.2.1 Pequenas Centrais Termelétricas (PCT)

São unidades de geração que podem utilizar turbinas a vapor, turbinas a gás ou mesmo ciclo combinado (combinação das duas tecnologias). A figura 2.6 nos mostra um exemplo deste modelo.

A principal utilização desta tecnologia em médio porte, se dá principalmente com utilização de gás natural, biomassa e de processos de cogeração nos setores siderúrgico e sucroalcooleiro.

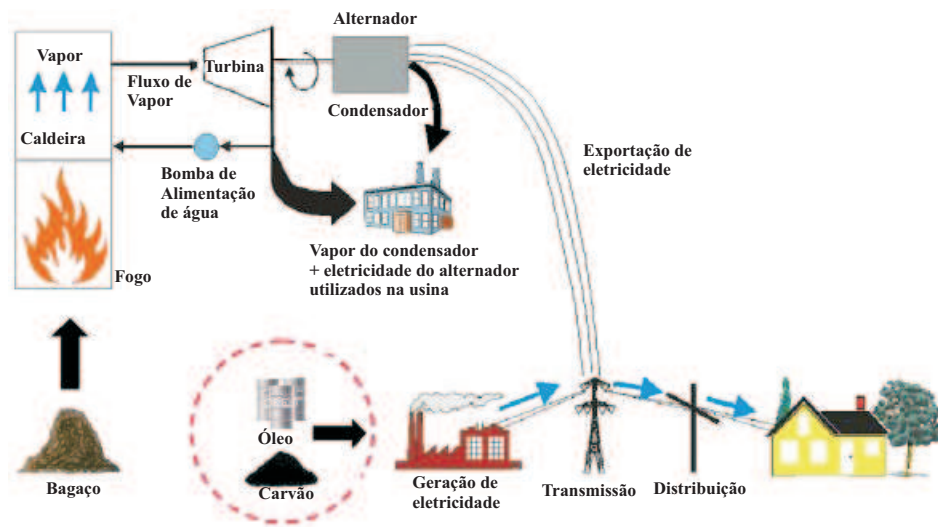


Figura 2.6: Sistema de co-geração de energia a partir de um resíduo agrícola (bagaço)

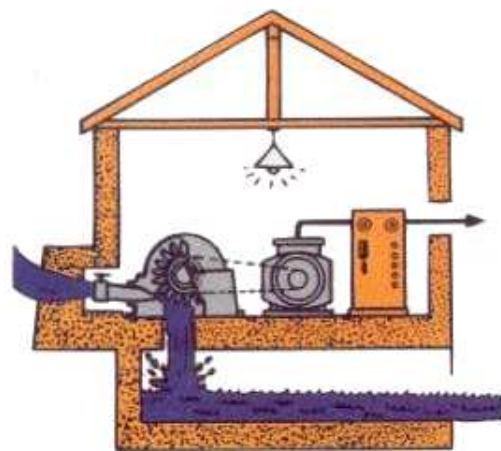
2.5.2.2 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH)

No Brasil, as PCH (figura 2.7) representam uma importante alternativa de produção de energia renovável, promovendo a ampliação da oferta de energia elétrica em áreas isoladas e em pequenos centros agrícolas e industriais. É uma tecnologia amplamente dominada em todas as suas etapas, e existe ainda um grande potencial a ser explorado.

A implementação de novos projetos de PCH poderá contribuir para o aumento da oferta de energia, e proporcionar benefícios elétricos e energéticos ao sistema.



(a) PCH Alto Fêmeas, localizada na região oeste da Bahia



(b) Esquema de uma PCH

Figura 2.7: Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH).

2.5.2.3 Usinas eólico-elétricas

O uso comercial da energia eólica é recente, porém essa é a fonte energética cujo uso mais cresce mundialmente: registrou-se, nos últimos cinco anos, uma expansão média anual de 30%. (DINIZ; CARVALHO; BARROS, 2004)

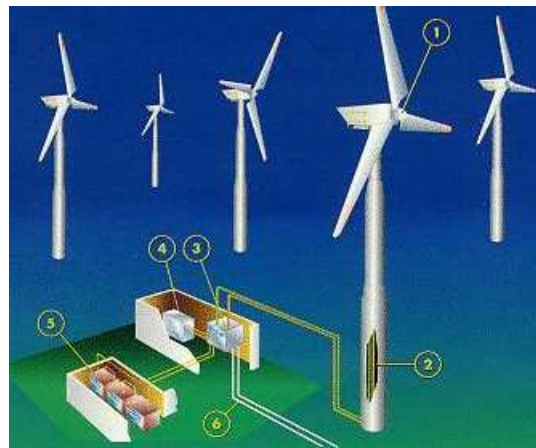


Figura 2.8: Sistema de geração de energia eólica.

A figura 2.8 apresenta o esquema de um sistema com energia eólica,

- | | | |
|-------------------|----------------------|-------------------------|
| 1. Gerador eólico | 2. Cabos de ligação | 3. Controlador |
| 4. Fonte auxiliar | 5. Banco de baterias | 6. Linha de transmissão |

2.6 Fontes com perspectivas de uso no Brasil

No Brasil há diversas fontes primárias de energia que podem ser utilizadas para a GD. Dentre estas destacam-se cinco fontes como sendo as mais favoráveis para utilização no Brasil devido a matéria prima (GOMES et al., 1999; MARIN, 2004):

- A geração eólica na região nordeste devido à grande quantidade de vento predominante nesta região. Há também outras regiões que têm demonstrado grande potência para utilizar a geração eólica.
- A presença de pequenas quedas de água em diversas localidades em todo país, que faz da PCH uma ótima escolha para ser utilizada como fonte de GD.
- A presente disponibilidade de grandes quantidades de gás natural nos grandes centros e a facilidade de seu uso, tem provocado o interesse nesta fonte primária.
- Por fim a utilização da biomassa e da luz solar através de painéis são opções a serem levadas também em consideração.

2.7 Grau de penetração da GD

De acordo com Gomes et al. (1999) é conveniente e necessária a existência de um indicador que mostre o grau de penetração da geração distribuída num dado sistema.

O Grau de Penetração (GP) em % é dado pela equação 2.1:

$$GP(\%) = \frac{PG}{P + PG} * 100 \quad (2.1)$$

onde: P é a carga suprida por geração externa e PG é a carga suprida pela geração local.

O grau máximo de penetração da GD é de difícil avaliação, pois depende do grau de intermitência das fontes de GD, da robustez da rede e de diversos outros fatores.

2.8 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos referentes à GD, tais como sua definição e características.

Também foram apresentadas algumas das tecnologias que estão disponíveis no mercado para a GD, bem como se estas tecnologias são de pequeno ou médio porte. Esta definição ocorre segundo as suas características construtivas ou de potência.

Finalmente, tem-se as perspectivas de utilização da GD pelo Brasil, devido a diversas fontes primárias de energia que podem ser utilizadas para a GD e o conceito de grau de penetração de fontes de GD.

Capítulo 3

Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDE)

3.1 Introdução

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) são os responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica para os consumidores. Os SEE são formados por diversos componentes. Isso se deve à necessidade de manter os padrões (continuidade, qualidade) de energia para os consumidores, estabelecidos pela resolução da ANEEL N.º 456, de 29 de novembro de 2000 .

A figura 3.1 representa um SEE fictício através do qual é possível ver alguns dos componentes que o compõem desde a geração da energia elétrica até o consumidor final.

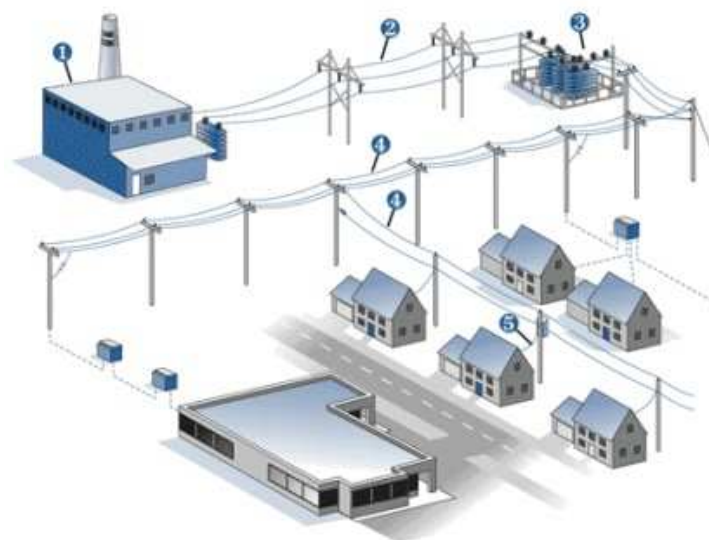


Figura 3.1: Principais componentes de um sistema elétrico. Fonte (MORETO, 2005)

O desenho 3.1 apresenta os seguintes componentes:

1. Geradora central de energia elétrica
2. Sistema de transmissão de energia elétrica
3. Subestação
4. Alimentadores e suas ramificações
5. Transformadores de distribuição

3.2 Sistema de distribuição

A figura 3.2 apresenta um sistema de distribuição com os seus principais componentes:

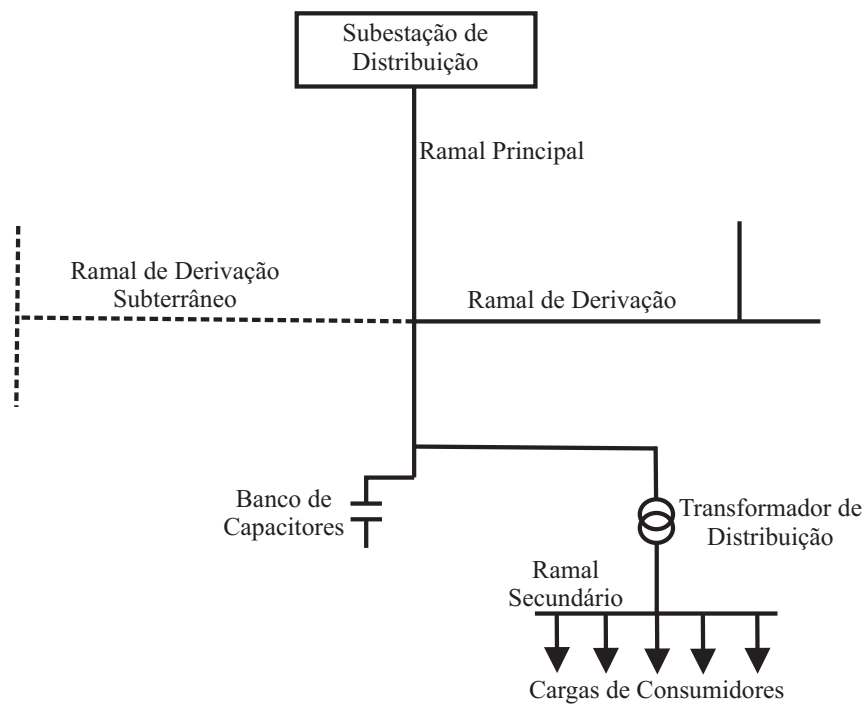


Figura 3.2: Sistema de distribuição. Fonte (COSER, 2006)

Dentre estes componentes se destacam:

- Subestação
- Redes primárias
- Redes secundárias

3.2.1 Subestação

A principal função de uma subestação de distribuição é reduzir a tensão das linhas de transmissão e de subtransmissão para os níveis de distribuição, fazendo a sua regulação para os níveis de tensão de distribuição especificados por cada empresa distribuidora de energia.

A figura 3.3 apresenta os principais componentes de uma subestação.

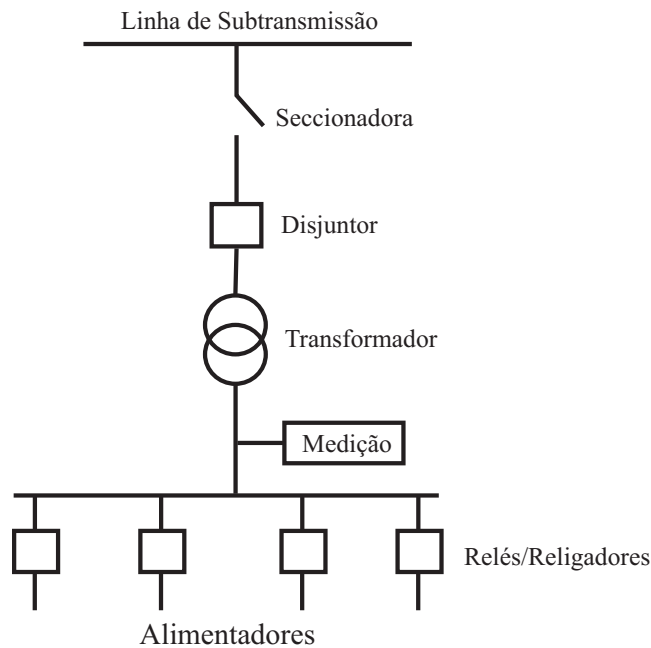


Figura 3.3: Principais componentes de uma subestação de distribuição.

3.2.2 Redes primárias

Também são chamadas de redes de Alta Tensão (AT) no âmbito dos sistemas de distribuição, definidos pelas classes de tensão de 15kV, 25kV ou 34,5kV, são constituídas por condutores de alumínio, cobre ou aço, na sua maioria de cabos nus (MAMEDE; SATO, 2003) que também podem ser protegidas contra danos mecânicos.

Alguns exemplos de redes primarias empregadas no Brasil:

- **Rede aérea com cabo nu**

É o padrão mais utilizado no Brasil, pois tem o menor custo relativo de projeto, porém possui um maior custo operacional em função de expor as fases a perturbações.

Os cabos são geralmente dispostos em estruturas de sustentação para redes aéreas na posição horizontal (como mostra a figura 3.4). Este modelo faz com que o número de acidentes e defeitos (que provocam curto-circuitos ou até mesmo queda de cabos), seja bem maior (AL-DABBAGH; AL-DABBAGH, 1999).



Figura 3.4: Rede aérea com cabo nu.

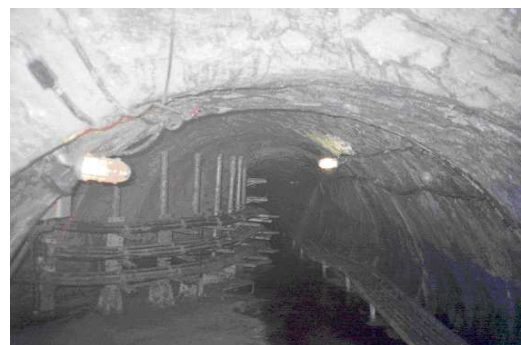
- **Rede subterrânea**

São utilizadas onde se faz necessário um alto índice de confiabilidade (pois há baixa probabilidade de ocorrer um curto-circuito monofásico, fase-fase ou trifásico (MAMEDE, 2004)) ou em locais que a disposição arquitetônica exige tal utilidade, como regiões centrais de grandes metrópoles, cidades históricas, etc.

Os cabos são isolados e podem ser dispostos em canaletas (como mostrado na figura 3.5), em dutos ou em contato direto com o solo ou com a água.



(a) Entrada da rede



(b) Túnel da rede

Figura 3.5: Rede subterrânea.

- **Rede aérea compacta com cabo protegido**

É utilizada principalmente em regiões onde há riscos de falhas provocadas pelo meio ambiente vegetal (árvores em contato com a rede provocando curto-circuito), sendo um padrão intermediário do ponto de vista da relação custo-benefício, entre as redes com cabo nu e aquelas com cabo isolado.

Os cabos são protegidos mecanicamente contra abrasão, não possuem isolamento para a classe de tensão de operação e estão dispostos em estruturas de sustentação para redes aéreas na posição horizontal ou losangular, com um cabo mensageiro, como mostrado na figura 3.6.



Figura 3.6: Rede aérea compacta com cabo protegido.

- **Rede aérea com cabo isolado**

São empregadas principalmente em regiões onde há um grande potencial de risco de contato acidental, pouco espaço aéreo, necessidade de passar vários circuitos por uma estrutura de sustentação e onde é requerido bom índice de continuidade.

Têm características muito similares as das redes subterrâneas, mas com uma sensível redução no custo de implantação.

Possuem cabos isolados, normalmente dispostos em estruturas de sustentação simples, como mostrado na figura 3.7.



Figura 3.7: Rede aérea com cabo isolado.

3.2.3 Redes secundárias

Também são chamadas de redes de Baixa Tensão (BT) nos sistemas de distribuição são definidas pelas tensões de 110V, 127V, 220V, 380V e 440V. Estas redes são definidas a partir dos transformadores de distribuição, conforme figura 3.2.

3.2.4 Regulador de tensão

Os reguladores de tensão são equipamentos projetados para medir e corrigir a tensão das linhas de distribuição. Foram desenvolvidos para ter instalação simples, fácil operação e manutenção mínima. Este equipamento é apresentado na figura 3.8.

O regulador é composto por um auto-transformador, com enrolamento série equipado com comutador de derivação sob carga, regula a tensão de linha em $\pm 10\%$ (ITB, 2006).

A disposição de no máximo 2 reguladores de tensão em um mesmo alimentador permite que ele seja longo, especialmente em áreas suburbanas e rurais, podendo alcançar várias dezenas de quilômetros de extensão.



Figura 3.8: Regulador de tensão. Fonte (ITB, 2006)

3.2.5 Banco de capacitores

Os bancos de capacitores montados em postes são os mais usados em redes de distribuição, pois são fáceis de instalar e requerem um mínimo de manutenção.

Os bancos fixos podem ser montados em grupos (ligação em estrela com neutro flutuante). Com módulos nas seguintes potências: 33.3, 50, 83.3, 100, 167, 200, 250, 300 e 400 kvar, podendo com estes módulos montar bancos trifásicos para as seguintes potências: 100, 150, 250, 300, 500, 600, 750, 900 e 1200 kvar. Depois de instalados fornecem sempre a mesma quantidade de kvar.

A intenção dos bancos automáticos chaveáveis é fornecer diferentes níveis de potência reativa para o sistema, durante as diferentes horas do dia (LEYDEN, 2006).

A figura 3.9(a) apresenta a imagem de um banco de capacitores fixo e a figura 3.9(b) a imagem de um banco de capacitor automático.



(a) Banco fixo



(b) Banco automático

Figura 3.9: Banco de capacitores. Fonte (LEYDEN, 2006)

3.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos referentes a sistemas de energia elétrica desde a sua geração até o consumo final, dando maior importância para os sistemas de distribuição.

Dentro dos sistemas de distribuição foram apresentados os elementos que o compõem, bem como as suas finalidades e aplicabilidade.

Capítulo 4

Fluxo de Potência para Redes de Distribuição

4.1 Introdução

Os principais métodos para a solução do problema de fluxo de potência em redes de distribuição radiais são apresentados por Srinivas (2000), e estão divididos em três grandes categorias:

- **Métodos de varredura direta e inversa;**

Os métodos de varredura direta e inversa são mais recomendados para sistemas radiais, podendo também ser utilizados em redes com poucas malhas (FALCÃO, 2003).

Nestes métodos podemos representar a rede de distribuição como sendo uma árvore orientada, onde a subestação é a raiz, o ramal principal (alimentador) da rede é o tronco e os ramais laterais são os galhos da árvore, como podem ser vistos na figura 3.2.

O método consiste em realizar duas varreduras uma reversa e outra direta, onde na varredura reversa parte-se dos pontos mais extremos e com uma estimativa inicial das tensões nodais, vem calculando as correntes ou os fluxos até a subestação.

Baseado neste resultado e com o valor conhecido da tensão na subestação, inicia-se a varredura direta, onde se recalculam os valores de tensão dos nós até os pontos mais extremos.

Este processo se repete até que a diferença do valor de tensão em duas iterações sucessivas não seja maior do que uma tolerância pré-determinada (FALCÃO, 2003).

Há duas variantes principais: a primeira é em função da soma das correntes (SHIRMOHAMMADI et al., 1988), enquanto a segunda se baseia na soma das potências (FALCÃO, 2003).

- **Métodos baseados na matriz impedância nodal implícita.**

Os métodos baseados na matriz impedância nodal implícita, utilizam uma formulação mais adequada para sistemas malhados (CHEN et al., 1991), baseando-se na fatoração da matriz de admitância nodal (Y_{barra}) e injeções de corrente equivalentes para resolver a rede.

- **Fluxo de potência via Newton Raphson.**

Este método tradicionalmente usado em redes de extra e ultra alta tensão, também pode ser usado em redes de distribuição. Como é um método baseado na matriz Y_{nodal} , deve-se ter o cuidado de evitar mau condicionamento desta matriz na presença de trechos de alta e muita baixa impedância.

4.2 Método das somas das potências

O método que será utilizado nesta dissertação para cálculo das tensões da rede de distribuição será o método da Soma das Potências, por ser um método formal e robusto para redes de distribuição radiais, fornecendo bons resultados, com baixo tempo de computação e facilidade de modelagem dos componentes do sistema de distribuição.

A figura 4.1 apresenta um sistema de distribuição que consiste somente de um alimentador radial principal, com os respectivos elementos a serem considerados na obtenção das equações fundamentais. Não há geração distribuída conectada ao alimentador. (BARAN; WU, 1989)

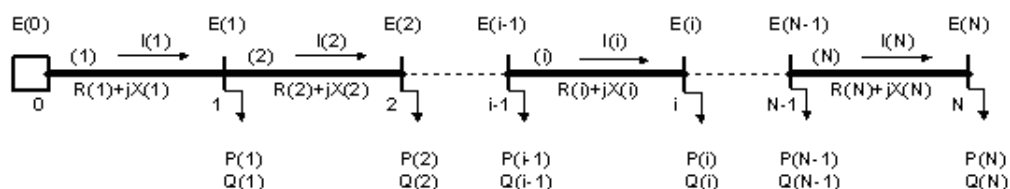


Figura 4.1: Alimentador principal, N nós e N ramos.

A figura 4.2 mostra o equivalente elétrico da figura 4.1 onde: V_0 é o módulo de tensão na subestação e V_1 é o módulo da tensão no nó equivalente.

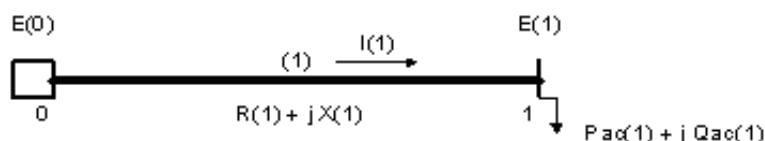


Figura 4.2: Equivalente elétrico.

4.2.1 Cálculo das potências acumuladas

Segundo a figura 4.2 as potências ativa e reativa totais acumuladas, têm as seguintes equações:

$$Pac_1 = \sum_{i=1}^N P_i + \sum_{i=2}^N LP_i \quad (4.1)$$

$$Qac_1 = \sum_{i=1}^N Q_i + \sum_{i=2}^N LQ_i \quad (4.2)$$

onde, N é o número total de nós, Pac_1 e Qac_1 são as demandas ativa e reativa totais acumuladas no nó 1¹, P_i e Q_i são as demandas ativa e reativa no nó i , LP_i e LQ_i são as perdas de potência ativa e reativa no ramo i .

Está claro nas equações 4.1 e 4.2 que o total da carga que se alimenta desde o nó 1 até o final é a carga no nó 1, mais as cargas de todas os outros nós, mais as perdas de todos os ramos exceto o ramo 1. Assim as equações 4.1 e 4.2, podem ser generalizadas para o cálculo das potências acumuladas em cada nó.

$$Pac_i = Pac_{i+1} + LP_{i+1} \quad (4.3)$$

$$Qac_i = Qac_{i+1} + LQ_{i+1} \quad (4.4)$$

onde, Pac_i e Qac_i são as potências ativa e reativa acumuladas no nó i .

Quando um dado nó tem mais de um sucessor, as potências acumuladas naquele nó são expressas por:

$$Pac_i = \sum_j Pac_j + \sum_j LP_j \quad (4.5)$$

$$Qac_i = \sum_j Qac_j + \sum_j LQ_j \quad (4.6)$$

onde, j representa os nós imediatamente a jusante do nó i .

¹Que são também os fluxos ativos e reativos no trecho i (que termina no nó i)

4.2.2 Cálculo das potências acumuladas na presença de GD

Suponha que há uma geração (P_{gi} e Q_{gi}) conectada ao nó i , neste caso as potências acumuladas no nó i valem:

$$P_{ac_i} = P_i + P_{ac_{i+1}} + LP_{i+1} - P_{gi} \quad (4.7)$$

$$Q_{ac_i} = Q_i + Q_{ac_{i+1}} + LQ_{i+1} - Q_{gi} \quad (4.8)$$

Caso uma ou outra, ou ambas as potências acumuladas forem negativas, isto implica a existência de fluxo reverso, ou seja a GD abastece não só as cargas a jusante como parte de montante.

Neste caso, a perda correspondente ao trecho deve ser creditada à barra de onde parte o fluxo. Logo a potência acumulada no nó antecessor passa a ser:

$$P_{ac_i} = P_i + P_{ac_{i+1}} - LP_{i+1} - P_{gi} \quad \text{se} \quad P_{ac_{i+1}} < 0 \quad (4.9)$$

$$Q_{ac_i} = Q_i + Q_{ac_{i+1}} - LQ_{i+1} - Q_{gi} \quad \text{se} \quad Q_{ac_{i+1}} < 0 \quad (4.10)$$

4.2.3 Cálculo das perdas ativa e reativa

As perdas para cada ramo, tanto ativa como reativa, são calculadas com as seguintes equações:

$$LP_i = \frac{R_i * (P_{ac_i}^2 + Q_{ac_i}^2)}{V_i^2} \quad (4.11)$$

$$LQ_i = \frac{X_i * (P_{ac_i}^2 + Q_{ac_i}^2)}{V_i^2} \quad (4.12)$$

onde, R_i e X_i são a resistência e a reatância indutiva, respectivamente, do i -ésimo ramo e V_i é o módulo de tensão no nó i .

4.2.4 Cálculo das tensões

Observando o trecho i entre os nós $i-1$ e i da figura 4.1, tem-se a expressão de fluxo complexo:

$$S_{ac_i} = P_{ac_i} + jQ_{ac_i} = -E_i * I_{i,i-1}^* \quad (4.13)$$

onde

$$I_{i,i-1} = (E_i - E_{i-1}) * Y_i \quad (4.14)$$

sendo que a admitância do trecho i é:

$$Y_i = G_i + jB_i = |Y_i| \angle (\psi_i) \quad (4.15)$$

onde, ψ_i é o ângulo da admitância do trecho i .

Substituindo a equação 4.15 na equação 4.14 e esta na equação 4.13, temos:

$$S_{ac_i} = -V_i^2 * (G_i - jB) + V_i * V_{i-1} * |Y_i| * \angle (\theta_i - \theta_{i-1} - \psi_i) \quad (4.16)$$

Separando a parte real e imaginária, temos:

$$P_{ac_i} = -V_i^2 * G_i + V_i * V_{i-1} * |Y_i| * \cos (\theta_i - \theta_{i-1} - \psi_i) \quad (4.17)$$

$$Q_{ac_i} = V_i^2 * B_i + V_i * V_{i-1} * |Y_i| * \sin (\theta_i - \theta_{i-1} - \psi_i) \quad (4.18)$$

Isolando o *coseno* da equação 4.17, temos:

$$\cos (\theta_i - \theta_{i-1} - \psi_i) = \frac{P_{ac_i} + V_i^2 * G_i}{V_i * V_{i-1} * |Y_i|} \quad (4.19)$$

E isolando o *seno* da equação 4.18, temos:

$$\sin (\theta_i - \theta_{i-1} - \psi_i) = \frac{Q_{ac_i} - V_i^2 * B}{V_i * V_{i-1} * |Y_i|} \quad (4.20)$$

Lembrando que,

$$\cos^2(x) + \sin^2(x) = 1 \quad (4.21)$$

resulta:

$$(G_i^2 + B_i^2) * V_i^4 + \left[2 * (Pac_i * G_i - Qac_i * B_i) - V_{i-1}^2 * |Y_i|^2 \right] * V_i^2 + Pac_i^2 + Qac_i^2 = 0 \quad (4.22)$$

a equação 4.22 é uma equação biquadrada em V_i , e lembrando que:

$$Z_i = R_i + jX_i = \frac{1}{(G_i + jB_i)} \quad (4.23)$$

ela pode ser reescrita como:

$$V_i^4 + A_i * V_i^2 + B_i = 0 \quad (4.24)$$

onde:

$$A_i = 2 * (Pac_i * R_i + Qac_i * X_i) - V_{i-1}^2 \quad (4.25)$$

$$B_i = (Pac_i^2 + Qac_i^2) * (R_i^2 + X_i^2) \quad (4.26)$$

A solução da equação biquadrada fornece: (DAS; KOTHARI; KALAM, 1995)

$$V_i = \sqrt{-\frac{A_i}{2} + \sqrt{\left(\frac{A_i}{2}\right)^2 - B_i}} \quad (4.27)$$

onde, V_{i-1} é a magnitude do fasor tensão do nó antecessor do ramo i e V_i é a magnitude do fasor tensão do nó sucessor do ramo i .

4.2.5 Cálculo dos ângulos das tensões

Observe que ao longo do procedimento de cálculo não houve a necessidade de conhecer os ângulos das tensões. Após a convergência pode-se calcular a abertura angular do trecho mediante uma das seguintes expressões:

$$\theta_{i,i-1} = \theta_i - \theta_{i-1} = \arctan \left(\frac{Qac - V_i^2 * B}{Pac + V_i^2 * G_i} + \psi_i \right) \quad (4.28)$$

$$\tan \theta_{i,i-1} = \frac{Pac_i * X_i - Qac_i * R_i}{Pac_i * R_i + Qac_i * X_i + V_i^2} \quad (4.29)$$

onde $\theta_{i,i-1}$ é a diferença angular entre V_{i-1} e V_i .

4.2.6 Equações para o cálculo de outros parâmetros do sistema

As correntes em cada ramo são calculadas com a equação:

$$I_i = \frac{\sqrt{Pac_i^2 + Qac_i^2}}{V_i} \quad (4.30)$$

onde, I_i é a corrente no ramo i .

Após a convergência do processo iterativo efetua-se o cálculo das perdas ativa e reativa totais do sistema utilizando as equações 4.31 e 4.32.

$$SLP = \sum_{i=1}^N LP(i) \quad (4.31)$$

$$SLQ = \sum_{i=1}^N LQ(i) \quad (4.32)$$

onde, SLP e SLQ são as perdas ativa e reativa totais do sistema.

4.3 Fluxograma do método das somas das potências

O método da soma das potências é um método iterativo, composto basicamente pelas seguintes etapas:

1. Cálculo das potências acumuladas em cada nó, no sentido dos nós terminais para o nó fonte;
2. Cálculo das tensões nodais em cada nó, no sentido do nó fonte para os nós terminais (a tensão do nó fonte é conhecida);
3. Verificação da convergência: módulo da diferença entre tensões em iterações sucessivas menor que tolerância especificada;
4. Teste de convergência: Se o critério de convergência for satisfeito, pára o processo e calcula-se a abertura angular seguida da impressão dos resultados. Caso não seja satisfeito o critério de convergência, volta ao passo 2.

O fluxograma para o método da soma das potências é apresentado na figura 4.3

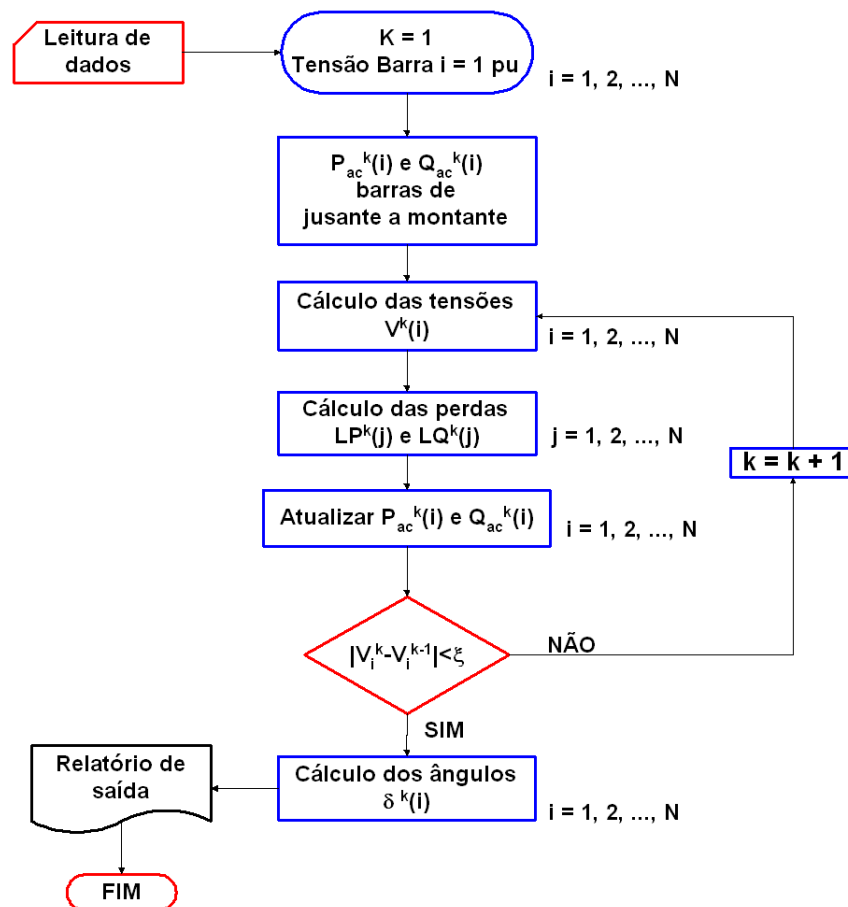


Figura 4.3: Fluxograma do método da soma das potências.

4.4 Conclusão

Neste capítulo foram mencionados alguns dos tipos de métodos de cálculos de fluxo de potência para sistemas de distribuição, tais como métodos de varredura direta e inversa, métodos baseados na matriz impedância nodal implícita e o método de Newton Raphson.

O método escolhido como base para esta dissertação foi o método de varredura somas das potências.

A partir desta escolha foi detalhada esta metodologia, onde foram descritas todas as equações utilizadas nesta metodologia bem como o fluxograma necessário para resolver o problema.

Capítulo 5

Fluxo de Potência Ótimo (FPO) via Método dos Pontos Interiores

5.1 Introdução

No início da década de 60, Carpentier (1962) introduziu uma formulação para o problema de despacho econômico, no qual ele incluía as equações de fluxo de carga, possibilitando o controle da tensão e outras restrições de operação. Essa formulação foi chamada mais tarde de problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO).

O FPO descreve uma ampla classe de problemas que envolve três elementos básicos: as variáveis, as restrições e a função objetivo, a ser otimizada, segundo as particularidades físicas e operacionais da rede elétrica. (MIKILITA, 2005)

A função objetivo do FPO representa o aspecto que se deseja otimizar, e sua formulação vai depender do que se deseja analisar (CASTRONUOVO, 2001), por exemplo:

- Minimização do custo de geração;
- Minimização de perdas;
- Maximização de determinada geração;
- Despacho ótimo de potência reativa;
- Corte de carga
- Transferência de potência entre áreas;
- Nivelamento do perfil de tensão das barras de carga;

As restrições a serem satisfeitas pelo problema de FPO podem ser restrições de igualdade ou de desigualdade.

As restrições de igualdade são representadas pelas equações não lineares do fluxo de potência correspondentes ao balanço de potência ativa e reativa em cada nó da rede. Também podem ser incluídas restrições que modelam características particulares da rede (AURICH, 2004).

As restrições de desigualdade são responsáveis por modelar os limites operacionais dos equipamentos bem como as faixas de operação para assegurar ao sistemas sua segurança (SIMÕES COSTA, 2005). As restrições também levam em conta os limites físicos das componentes do sistema (FERNANDES, 2004), onde:

- As restrições operacionais, são denominadas como sendo os limites das magnitudes das tensões nos barramentos, os limites de abertura angular de certas linhas, etc;
- As restrições de segurança, estão relacionadas com as possíveis contingências do sistema e são determinadas pela análise de segurança em tempo real;
- As restrições físicas, são denominadas como sendo os limites de geração de potência ativa e reativa, os limites nos valores dos taps, os limites de fluxo de corrente (potência aparente) nas linhas e outras.

Segundo Mikilita (2005), atualmente grande parte das pesquisas está voltada para aplicação dos métodos de pontos interiores para resolver problema de FPO.

5.2 Vantagens e desvantagens do FPO

De acordo com SIMÕES COSTA (2005) as principais vantagens do FPO em relação ao problema de Despacho Econômico (DE) clássico são:

- As equações são resolvidas simultaneamente;
- Limites físicos podem ser modelados, tais como:
 - Potências reativas geradas;
 - Magnitudes das tensões nas barras;
 - Fluxo de potência nos ramos;

- Também podem ser consideradas as restrições de segurança para análise contingências, tais como:
 - Limites superiores e inferiores para:
 - * Tensão;
 - * Carregamento das linhas.
- Utilização de outras variáveis de controle além das potências geradas, tais como:
 - Tensões nas barras;
 - Tensões de saída dos geradores;
 - Alívio de carga;
 - Taps de transformadores;
 - Taps de transformadores defasadores;
 - Injeção de potência reativa;
 - Ajuste dos bancos de capacitores chaveados;
- Utilização de mais de uma função objetivo.

O FPO é uma ferramenta poderosa de otimização, ou seja, de síntese evitando-se assim um grande número de tentativas de análise usando a ferramenta de fluxo de potência para inferir uma solução possivelmente subótima.

Como desvantagens principais do FPO, pode-se citar a lentidão de solução e a dificuldade de convergência em sistemas de grande porte.

5.3 Formulação geral do FPO

O problema de FPO busca otimizar uma função específica (encontrar o seu ponto de mínimo ou de máximo) denominada de função objetivo, satisfazendo às restrições que são regidas por particularidades operacionais e físicas da rede elétrica (KOPCAK, 2003).

No problema de FPO os modelos matemáticos utilizados envolvem dificuldades como não-linearidades, não-convexidades, grande número de restrições e variáveis discretas, o que ocasiona um problema de difícil solução.

O FPO pode ser modelado segundo Almeida (1994), Kopcak (2003), Lescano (2004) como sendo:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(x) \\ \text{S.A. :} \quad & g(x) = 0 \\ & h(x) \geq 0 \end{aligned} \tag{5.1}$$

em que:

$f(x)$: Função objetivo;

$g(x)$: Restrições de igualdade;

$h(x)$: Restrições de desigualdade;

Pela equação 5.1, temos a seguinte função Lagrangeana.

$$\mathcal{L}(x, \lambda) = f(x) - \lambda^t * g(x) - \pi^t * h(x) \tag{5.2}$$

em que:

λ : são os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade.

π : são os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de desigualdade.

5.4 Métodos de Pontos Interiores (PI)

Desde de 1984 o Método dos Pontos Interiores (PI) vem sendo largamente utilizado, principalmente após a introdução do algoritmo polinomial para problemas de Programação Linear (PL) de Karmarkar (1984).

O método consiste em buscar a solução ótima reduzindo a função objetivo, no caso de minimização, mantendo a busca no interior da região delimitada pelas restrições (CARVALHO, 1999).

Para tanto, o método se baseia em transformar as restrições de desigualdades em igualdade, por meio da introdução de variáveis de folga não-negativas, e adicionar uma função barreira logarítmica à função objetivo, como forma de garantir a não negatividade dessas variáveis de folga.

Considerando o seguinte problema.

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & f(x) \\
 \text{S.A. :} \quad & g(x) = 0 \\
 & h(x) \geq h^{\min} \\
 & h(x) \leq h^{\max}
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

em que:

$f(x)$: Função objetivo;

$g(x)$: Restrições de igualdade;

$h(x)$: Restrições de desigualdade;

h^{\min} e h^{\max} : Limites mínimo e máximo das restrições de desigualdade .

Para montarmos a função Lagrangeana, tem-se que (GRANVILLE, 1994)

1. Transformar as restrições de desigualdade em restrições de igualdade com o uso de variáveis de folga.

$$\begin{aligned}
 h(x) - s_1 - h^{\min} &= 0 \\
 h(x) + s_2 - h^{\max} &= 0 \\
 s_1, s_2 &> 0
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

em que:

s_1 e s_2 : São as variáveis de folga;

2. Adicionar a barreira logarítmica

$$f(x) - \mu * \left[\sum_i \ln(s_1)_i + \sum_i \ln(s_2)_i \right] \tag{5.5}$$

Com a aplicação as equações 5.4 e 5.5 no problema da equação 5.3 temos o seguinte problema:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & f(x) - \mu * \left[\sum_i \ln(s_1)_i + \sum_i \ln(s_2)_i \right] \\
 \text{S.A. :} \quad & g(x) = 0 \\
 & h(x) \geq h^{\min} \\
 & h(x) \leq h^{\max} \\
 & s_1, s_2 > 0
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Pela da equação 5.6 temos a seguinte função Lagrangeana.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2) = & f(x) - \lambda^t * g(x) - \pi_1^t * [h(x) - s_1 - h^{min}] - \pi_2^t * [h(x) + s_2 - h^{Max}] - \\ & - \mu * [\sum_i \ln(s_1) + \sum_i \ln(s_2)] \end{aligned} \quad (5.7)$$

Aplicando as condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) para o Lagrangeano da equação 5.7, temos:

$$\begin{aligned} \nabla_x \mathcal{L}(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2) &= \nabla_x f(x) - \nabla_x g(x)^t * \lambda - \nabla_x h(x)^t * (\pi_1 + \pi_2) &= 0 \\ \nabla_\lambda \mathcal{L}(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2) &= -g(x) &= 0 \\ \nabla_{\pi_1} \mathcal{L}(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2) &= -[h(x) - s_1 - h^{min}] &= 0 \\ \nabla_{\pi_2} \mathcal{L}(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2) &= -[h(x) + s_2 - h^{Max}] &= 0 \\ \nabla_{s_1} \mathcal{L}(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2) &= \mu^* e^{-s_1} \pi_1 &= 0 \\ \nabla_{s_2} \mathcal{L}(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2) &= \mu^* e^{-s_2} \pi_2 &= 0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

em que:

$\nabla_x f(x)$: Vetor gradiente de $f(x)$;

$\nabla_x g(x)$: Vetor gradiente de $g(x)$;

e : base dos logaritmos neperianos.

O sistema de equações 5.8 é não linear. Para resolvê-lo utiliza-se o Método de Newton que lineariza o sistema em torno dos valores correntes das variáveis. Isto requer a obtenção da seguinte matriz, chamada matriz dos coeficientes de linearização.

$$H(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2) = \nabla^2 \mathcal{L}(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2) \quad (5.9)$$

matriz dos coeficientes de linearização:

$$H = \begin{bmatrix} a_{11} & (-J(x))^t & (-\nabla_x h(x))^t & (-\nabla_x h(x))^t & 0 & 0 \\ -J(x) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\nabla_x h(x) & 0 & U & 0 & 0 & 0 \\ -\nabla_x h(x) & 0 & 0 & -U & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -s_1 & 0 & -\Pi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_2 & 0 & \Pi_2 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

onde:

$$a_{11} = \nabla_x^2 f(x) - \sum_i \lambda_i * \nabla_x^2 g_i(x) - \sum_j (\pi_1 + \pi_2) * \nabla_x^2 h_j(x)$$

em que:

a_{11} : é a matriz Hessiana do problema;

$J(x)$: é a matriz Jacobiana do Fluxo de Potência;

U : é uma matriz identidade;

Π_1 : é uma matriz diagonal com os valores de π_1 ;

Π_2 : é uma matriz diagonal com os valores de π_2 .

Calcula-se o vetor Δy por:

$$-H * \Delta y = \nabla \mathcal{L} \quad (5.11)$$

$$\Delta y = -H^{-1} * \nabla \mathcal{L} \quad (5.12)$$

onde Δy é o vetor de incrementos de todas as variáveis do problema.

Com as equações 5.13 e 5.14 tem-se o passo primal e dual (SALGADO, 2005)

$$\alpha_p = \min \left[\min_{\nabla s_{1_i} < 0} \frac{s_{1_i}}{|\Delta s_{1_i}|}, \min_{\nabla s_{2_i} < 0} \frac{s_{2_i}}{|\Delta s_{2_i}|}, 1, 0 \right] \quad (5.13)$$

$$\alpha_d = \min \left[\min_{\nabla \pi_{1_i} < 0} \frac{\pi_{1_i}}{|\Delta \pi_{1_i}|}, \min_{\nabla \pi_{2_i} < 0} \frac{\pi_{2_i}}{|\Delta \pi_{2_i}|}, 1, 0 \right] \quad (5.14)$$

Para atualização das variáveis.

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k + \sigma * \alpha_p * \Delta x^k \\ \lambda^{k+1} &= \lambda^k + \sigma * \alpha_d * \Delta \lambda^k \\ \pi_1^{k+1} &= \pi_1^k + \sigma * \alpha_d * \Delta \pi_1^k \\ \pi_2^{k+1} &= \pi_2^k + \sigma * \alpha_d * \Delta \pi_2^k \\ s_1^{k+1} &= s_1^k + \sigma * \alpha_p * \Delta s_1^k \\ s_2^{k+1} &= s_2^k + \sigma * \alpha_p * \Delta s_2^k \end{aligned} \quad (5.15)$$

em que:

σ é uma constante cuja função é garantir que as variáveis π e s não se anulem. De acordo com Granville (1994) este valor é de $\sigma = 0.9995$.

Por isso, a finalidade do passo α_p e α_d é garantir que as variáveis de folga não sejam negativas.

O valor do parâmetro da barreira é atualizado através da seguinte equação:

$$\mu = \frac{s * \pi}{2 * l * \beta} \quad (5.16)$$

em que:

l : é o número de restrições de desigualdade;

β : é uma constante;

5.5 Fluxograma.

O algoritmo para resolver o problema de FPO via métodos dos pontos interiores pode ser representado pelos seguintes passos:

1. *Inicialização das variáveis.;*
2. *Cálculo do vetor gradiente, expresso pela equação 5.8;*
3. *Cálculo da matriz dos coeficientes de linearização, expresso pela equação 5.10 ;*
4. *Cálculo do vetor delta, expresso pela equação 5.12;*
5. *Determina α_p , expresso pela equação 5.13;*
6. *Determina α_d , expresso pela equação 5.14;*
7. *Atualiza as variáveis de otimização, expresso pela equação 5.15;*
8. *Atualiza a variável μ , expresso pela equação 5.16;*
9. *Teste de convergência: se o critério de convergência for satisfeito, para o processo e imprime os resultados, caso não seja satisfeito volta ao passo 2.;*

O fluxograma para o FPO via método dos pontos interiores é apresentado na figura 5.1

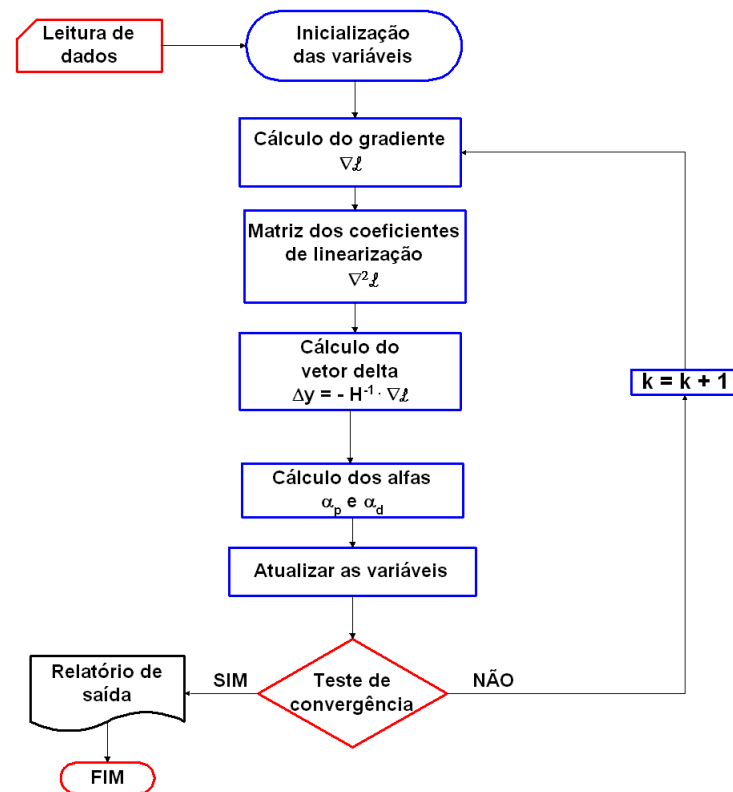


Figura 5.1: Fluxograma do FPO via método dos pontos interiores.

5.6 Conclusão

Neste capítulo foram ilustrados conceitos referentes ao FPO, bem como a formulação de um FPO convencional e a descrição mais elaborada de um FPO através do método de pontos interiores, onde apresentam-se as equações responsáveis por esta metodologia como também o fluxograma que mostra o procedimento da resolução deste método.

Capítulo 6

Descrição do Programa Desenvolvido

6.1 Introdução

O programa desenvolvido tem como finalidade resolver um problema de otimização via método dos pontos interiores (a formulação detalhada deste método está apresentada no capítulo 5), que consiste em maximizar a potência ativa gerada pelas unidades de GD presentes na rede de distribuição de energia elétrica, com as seguintes restrições:

- restrição de igualdade que é o balanço da potência representados aqui pela equação biquadrada em cada nó ($V_i^4 + A_i * V_i^2 + B_i = 0$). Esta equação é obtida a partir do fluxo de potência para redes de distribuição de energia elétrica via método da soma das potências, cuja metodologia é detalhada no capítulo 4;
- restrição referente aos níveis máximos e mínimos de potência ativa gerada ($Pg_i^{min} \leq Pg_i \leq Pg_i^{Max}$);
- restrição referente aos níveis de tensão máximo e mínimo ($V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{Max}$).

6.2 Formulação do problema

A formulação do FPO para o problema proposto nesta dissertação está apresentada na equação 6.1.

$$\begin{aligned}
 \text{Max} \quad & \sum_{i=0}^n Pg_i \\
 \text{S.A. :} \quad & V_i^4 + A_i(V_{i-1}) * V_i^2 + B_i = 0 \\
 & Pg_i \leq Pg_i^{Max} \\
 & Pg_i \geq Pg_i^{min} \\
 & V_i \leq V_i^{Max} \\
 & V_i \geq V_i^{min} \\
 & \forall i = 1, \dots, n
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

onde:

$$\begin{aligned}
 A_i(V_{i-1}) &= 2 * (Pac_i * R_i + Qac_i * X_i) - V_{i-1}^2 \\
 B_i &= (Pac_i^2 + Qac_i^2) * (R_i^2 + X_i^2) \\
 Pac_i &= P_i + Pac_{i+1} + LP_{i+1} - Pg_i \\
 Qac_i &= Q_i + Qac_{i+1} + LQ_{i+1}
 \end{aligned}$$

em que:

Pg_i : Potência ativa gerada pelo gerador conectado ao nó i ;

Pg_i^{Max} : Limite superior da potência ativa gerada pelo gerador conectado ao nó i ;

Pg_i^{min} : Limite inferior da potência ativa gerada pelo gerador conectado ao nó i ;

V_i : Módulo da tensão no nó i ;

V_i^{Max} : Módulo do limite superior da tensão no nó i definida como sendo 1,05pu, estabelecido pela ANEEL;

V_i^{min} : Módulo do limite inferior da tensão no nó i definida como sendo 0,93pu, estabelecido pela ANEEL;

V_{i-1} : Módulo da tensão no nó antecessor;

R_i : Resistência do trecho a montante do nó i ;

X_i : Reatância indutiva do trecho a montante do nó i ;

Pac_i : Potência ativa acumulada no nó i que é o fluxo ativo no trecho i ;

Qac_i : Potência reativa acumulada no nó i que é o fluxo reativo no trecho i ;

P_i : Potência ativa da carga junto ao nó i ;

Q_i : Potência reativa da carga junto ao nó i ;

LP_{i+1} : Perda de potência ativa no trecho posterior;

LQ_{i+1} : Perda de potência reativa no trecho posterior.

As perdas ativas e reativas são calculadas mediante as equações 6.2 e 6.3. Se o fluxo correspondente ao trecho for negativo, ele é dito reverso, ou seja a GD é de tal magnitude que atende a carga a jusante e a montante do ponto de conexão da GD. Neste caso a perda do trecho correspondente deve ser subtraída no cálculo da potência acumulada do nó antecessor.

$$LP_i = \frac{R_i * (Pac_i^2 + Qac_i^2)}{V_i^2} \quad (6.2)$$

$$LQ_i = \frac{X_i * (Pac_i^2 + Qac_i^2)}{V_i^2} \quad (6.3)$$

A partir da formulação do FPO apresentada pela equação 6.1, pode-se montar a função Lagrangeana, que está apresentada pela equação 6.4:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(Pg_i, V_i, \lambda_i, \pi_i, S_i) = & - \sum_{i=1}^n Pg_i - \sum_{i=1}^k \lambda_i * (V_i^4 + (2 * (Pac_i * R_i + Qac_i * X_i) - \\ & - V_{i-1}^2) * V_i^2 + (Pac_i^2 + Qac_i^2) * (R_i^2 + X_i^2)) - \\ & - \sum_{i=1}^k \pi_{1i} (Pg_i - Pg_i^{Max} + S_{1i}) - \sum_{i=1}^k \pi_{2i} (Pg_i - Pg_i^{\min} - S_{2i}) - \\ & - \sum_{i=1}^k \pi_{3i} (V_i - V_i^{Max} + S_{3i}) - \sum_{i=1}^k \pi_{4i} (V_i - V_i^{\min} - S_{4i}) - \\ & - \sum_{i=1}^k \mu * \ln(S_{1i}) - \sum_{i=1}^k \mu * \ln(S_{2i}) - \sum_{i=1}^k \mu * \ln(S_{3i}) - \sum_{i=1}^k \mu * \ln(S_{4i}) \end{aligned} \quad (6.4)$$

em que:

n : número de geradores;

k : número de nós.

Após montada a função Lagrangeana da equação 6.4, é montado o vetor gradiente do problema expresso pela equação 6.5. O vetor gradiente é a primeira derivada da função Lagrangeana (equação 6.4), em relação a todas as variáveis do problema (Pg e V), em relação os multiplicadores de Lagrange (λ, π) e em relação as variáveis de folga S .

Sendo assim tem-se:

$$\nabla \mathcal{L}(Pg_i, V_i, \lambda_i, \pi_i, S_i) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial Pg_i} \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial V_i} \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_i} \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \pi_i} \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial S_i} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

O gradiente da função Lagrangeana (equação 6.4) em relação a cada unidade de GD do alimentador está representada na equação 6.6:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial Pg_i} = -1 - \lambda_i * (2 * R_i * V_i^2 - 2 * Pac_i * (R_i^2 + X_i^2)) - \pi 1_i - \pi 2_i \quad (6.6)$$

A equação 6.7 é o gradiente da função Lagrangeana (equação 6.4), em relação a tensão em cada uma das barras do alimentador:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial V_i} = & -\lambda_i * (4 * V_i^3 + 2 * (2 * Pac_i * R_i + 2 * Qac_i * X_i - V_{i-1}^2) * V_i) + \\ & + 2 * \lambda_{i+1} * V_i * V_{i+1} - \pi 3_i - \pi 4_i \end{aligned} \quad (6.7)$$

Desta forma a equação 6.8, é o gradiente em relação aos multiplicadores de Lagrange λ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_i} = & -V_i^4 - (2 * Pac_i * R_i + 2 * Qac_i * X_i - V_{i-1}^2) * V_i^2 - \\ & - (Pac_i^2 + Qac_i^2) * (R_i^2 + X_i^2) \end{aligned} \quad (6.8)$$

A equação 6.9 é o gradiente da função Lagrangeana (equação 6.4) em relação aos multiplicadores de Lagrange π :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \pi_i} = \begin{cases} Pg_i - Pg_i^{Max} + S1_i \\ Pg_i - Pg_i^{min} - S2_i \\ V_i - V_i^{Max} + S3_i \\ V_i - V_i^{min} - S4_i \end{cases} \quad (6.9)$$

O gradiente da função Lagrangeana (equação 6.4) em relação às variáveis de folga S do alimentador está representada na equação 6.10:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial S_i} = \begin{cases} -\pi 1_i * S1 - \mu \\ \pi 2_i * S2 - \mu \\ -\pi 3_i * S3 - \mu \\ \pi 4_i * S4 - \mu \end{cases} \quad (6.10)$$

Após montado o vetor gradiente expresso pela equação 6.5, é obtida a matriz dos coeficientes de linearização que está apresentada pela equação 6.11. Esta matriz é formada pelas derivadas segundas, sendo que cada um dos valores do vetor gradiente (equação 6.5) é derivado novamente em relação a todas as variáveis do problema (Pg e V), bem como os multiplicadores de Lagrange (λ, π) e as variáveis de folga S .

$$\nabla^2 \mathcal{L}(Pg_i, V_i, \lambda_i, \pi_i, S_i) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial Pg_i^2} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial Pg_i \partial V_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial Pg_i \partial \lambda_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial Pg_i \partial \pi_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial Pg_i \partial S_i} \\ \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial V_i \partial Pg_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial V_i^2} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial V_i \partial \lambda_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial V_i \partial \pi_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial V_i \partial S_i} \\ \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \lambda_i \partial Pg_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \lambda_i \partial V_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \lambda_i^2} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \lambda_i \partial \pi_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \lambda_i \partial S_i} \\ \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \pi_i \partial Pg_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \pi_i \partial V_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \pi_i \partial \lambda_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \pi_i^2} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \pi_i \partial S_i} \\ \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial S_i \partial Pg_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial S_i \partial V_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial S_i \partial \lambda_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial S_i \partial \pi_i} & \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial S_i^2} \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

A equação 6.12 mostra, em particular, qual é a constituição da matriz dos coeficientes de linearização para o problema específico:

$$H = \nabla^2 \mathcal{L} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21}^t & a_{31}^t & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{32}^t & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -S1_i & 0 & 0 & 0 & -\pi 1_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S2_i & 0 & 0 & 0 & \pi 2_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -S3_i & 0 & 0 & 0 & -\pi 3_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S4_i & 0 & 0 & 0 & \pi 4_i \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

em que:

$$a_{11} : -\sum (\lambda_i * (R_i^2 + X_i^2))$$

$$a_{21} : \sum (4 * \lambda_i * R_i * V_i)$$

$$a_{31} : \sum (2 * R_i * V_i^2 + 2 * Pac_{i+1} * (R_i^2 + X_i^2))$$

$$a_{22} : -\sum (\lambda_i * (12 * V_i^2 + 4 * Pac_i * R_i + 4 * Qac_i * X_i - 2 * V_{i-1}^2))$$

$$a_{32} : -\sum (4 * V_i^3 - 2 * (2 * Pac_{i+1} * R_i + Qac_i * X_i - * V_{i-1}^2) * V_i)$$

Com isso, monta-se o sistema linear:

$$-H * \Delta y = \nabla \mathcal{L} \quad (6.13)$$

Cuja solução é simbolizada por:

$$\Delta y = -H^{-1} * \nabla \mathcal{L} \quad (6.14)$$

onde, Δy é o vetor incremental das incógnitas P_g , V , λ , π e S .

Após obtido Δy , segue a mesma sequência de cálculos (equações 5.13 até 5.16) apresentado no capítulo 5.

6.3 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o programa desenvolvido para resolver o problema proposto, que é a maximização da potência ativa gerada por unidades de GD numa rede de distribuição de energia elétrica, sujeita a restrições de igualdade que é o balanço da potência ($V_i^4 + A_i * V_i^2 + B_i = 0$) em cada nó; restrições referente aos níveis máximos e mínimos de potência ativa gerada ($Pg_i^{min} \leq Pg_i \leq Pg_i^{Max}$) e restrições referente aos níveis de tensão máximo e mínimo ($V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{Max}$).

O programa tem como formulação um algoritmo de FPO sendo resolvido pelo método dos pontos interiores.

Todos os conceitos que foram utilizados para desenvolver este programa foram apresentados nos capítulos 3, 4 e 5. Com este conhecimento foi possível desenvolver o programa que foi utilizado para analisar as redes apresentadas no capítulo 7.

A linguagem utilizada para desenvolver o programa foi MATLAB, devido às facilidades de se trabalhar com matrizes, bem como ser uma linguagem mais didática e de fácil compreensão.

Capítulo 7

Simulações e Resultados Obtidos

7.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através do programa desenvolvido para a análise do perfil de tensão em redes de distribuição de energia elétrica com a presença de fontes de GD.

A todos os alimentadores analisados neste capítulo, seá aplicada a seguinte metodologia:

- Inicialmente é realizada uma análise do alimentador, sem a presença da GD;
- Posteriormente é realizada uma análise do alimentador, com a presença da GD;
- Finalmente são apresentadas as comparações gráficas do alimentador com e sem a presença da GD.

São considerados, como dados de entrada, os seguintes valores:

Tolerância = 1^{-10}

Número máximo de iterações = 1000

Valores iniciais das variáveis:

$$V = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad \lambda = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad \pi = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

Estes valores são os mesmos para todos os alimentadores analisados neste capítulo.

7.2 Resultados do sistema teste de 17 nós

O primeiro caso a ser analisado é um alimentador com 17 nós, parte do alimentador de 32 nós que está representado pela figura A.1 do Apêndice A, juntamente com os dados referentes a este alimentador.

A figura 7.1 apresenta o alimentador de 17 nós.



Figura 7.1: Sistema de 17 nós sem ramais laterais. Fonte (BARAN; WU, 1989)

7.2.1 Resultado sem a presença da GD

Os resultados para o alimentador de 17 nós, sem a presença de unidades de GD, estão apresentados abaixo. Nesta primeira parte os resultados apresentam os valores de módulo e ângulo de tensão. Os módulos de tensão são apresentados primeiramente em pu (com valor de tensão base de 12,66kV) e depois em valores absolutos.

Por se tratar de um alimentador radial seqüencial tem-se uma queda de tensão sucessiva em cada um dos nós do alimentador, como pode ser verificado pela tabela 7.1.

Tabela 7.1: Tensão nos nós.

Nó	Modulo tensão	Modulo tensão	Ângulo
	(pu)	(kV)	(o)
1	0.978	12.38	0.2
2	0.957	12.12	0.4
3	0.938	11.87	0.6
4	0.920	11.64	0.8
5	0.903	11.44	0.9
6	0.888	11.24	1.1
7	0.873	11.05	1.3
8	0.861	10.90	1.4
9	0.852	10.79	1.5
10	0.844	10.69	1.6
11	0.837	10.60	1.7
12	0.831	10.51	1.7
13	0.825	10.44	1.8
14	0.820	10.39	1.8
15	0.818	10.35	1.8
16	0.816	10.33	1.8
17	0.815	10.32	1.8

Esta queda consecutiva de tensão em cada um dos nós do alimentador faz com que as tensões, a partir do nó quatro, se tornem abaixo dos valores aceitáveis pelas normas da ANEEL. O valor mínimo aceitável para redes de distribuição é de 0,93pu. Os valores abaixo deste nível de tensão são apresentados na tabela 7.2, sendo possível detectar 14 nós com tensão inferior ao valor mínimo aceitável.

Tabela 7.2: Nós com tensão abaixo de 0.93pu.

Nó	Modulo tensão	Modulo tensão
	(pu)	(kV)
4	0.920	11.64
5	0.903	11.44
6	0.888	11.24
7	0.873	11.05
8	0.861	10.90
9	0.852	10.79
10	0.844	10.69
11	0.837	10.60
12	0.831	10.51
13	0.825	10.44
14	0.820	10.39
15	0.818	10.35
16	0.816	10.33
17	0.815	10.32

Este alimentador apresenta potências ativas e reativas de demanda, perdas e potências totais conforme mostrado na tabela 7.3.

Tabela 7.3: Valor das potências.

Potência Total		Potências das perdas do alimentador		Potência demanda	
(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)
1743,3	807,4	293,3	67,4	1505,0	740,0

Os valores referentes às correntes de cada linha do alimentador são apresentados em valores absolutos e valores percentuais(%), em termos de sua capacidade limite.

Para se calcular o valor percentual de carregamento do cabo que está sendo utilizado tem-se a seguinte equação:

$$(\%) = \left(\frac{I_{calculado}}{I_{Cabo}} \right) \times 100$$

Onde:

$I_{calculado}$: é a corrente que passa pelo cabo.

I_{Cabo} : é a corrente limite que o cabo suporta.

Já os valores de perda são os valores que estão sendo consumidos em cada uma das linhas, tanto os valores das correntes como os valores das perdas são apresentados na tabela 7.4.

Tabela 7.4: Valor das correntes e perdas nós trechos.

Trecho	I do cabo	I calculado	Utilização do cabo	Perdas	
	(A)	(A)	%	(kW)	(kvar)
1	120	87.61	73.01	41.06	11.61
2	120	83.02	69.19	36.87	10.42
3	120	77.50	64.58	32.12	9.08
4	120	72.71	60.59	28.28	7.99
5	120	65.64	54.70	23.05	6.51
6	120	62.26	51.88	20.73	5.86
7	120	59.03	49.19	18.64	5.27
8	120	47.35	39.46	11.99	3.39
9	120	35.51	29.59	6.75	1.91
10	120	32.15	26.79	5.53	1.56
11	120	28.76	23.97	4.42	1.25
12	120	25.84	21.53	3.57	1.01
13	120	22.04	18.37	2.60	0.73
14	120	18.23	15.19	1.78	0.50
15	120	10.44	8.70	0.58	0.16
16	120	7.07	5.89	0.27	0.08
17	120	3.54	2.95	0.07	0.02

Para a convergência desta simulação foram necessárias 14 iterações.

7.2.2 Resultado com a presença da GD

Para o alimentador com presença de GD, tem-se que inicialmente definir onde estão alocadas as unidades geradoras. Para as simulações deste sistema teste foi prevista a inserção de duas fontes de GD, sendo uma das fontes alocada no nó 04 e a outra no nó 13.

Após escolhidos os locais (os locais das unidades de GD foram arbitrários) para a inserção das fontes de GD entra-se com todos os dados referentes a este alimentador (anexo A), acrescentando os limites para a GD e os limites para os níveis de tensão, no programa de FPO via método dos pontos interiores (capítulo 6), que tem como função objetivo maximizar a geração de potência ativa nestes dois nós, tendo como limites o valor máximo da tensão e a potência máxima que pode ser despachada.

Com estes dados de entrada, o programa apresenta na tabela 7.5, os valores de módulo e ângulo de tensão. Os módulos de tensão são apresentados tanto em pu (com valor base de tensão e de 12,66kV) como em valor absoluto.

Nesta mesma tabela, pode-se observar a influência das unidades de GD presentes no alimentador, pois a presença destas unidades gera um acréscimo na tensão no alimentador como um todo. Pode-se verificar que o nível de tensão no nó 13 atinge o valor máximo especificado pelas normas da ANEEL, que é de 1,05pu, isso ocorre pois neste nó há injeção de potência ativa. Com isso, eleva-se também o nível de tensão de todos os nós próximos a este nó, melhorando assim os níveis de tensão do alimentador.

Tabela 7.5: Tensão nos nós.

Nó	Modulo tensão	Modulo tensão	Ângulo
	(pu)	(kV)	(o)
1	1.002	12.69	0.4
2	1.006	12.73	0.9
3	1.011	12.79	1.3
4	1.016	12.86	1.7
5	1.016	12.87	1.9
6	1.017	12.88	2.2
7	1.019	12.90	2.5
8	1.022	12.94	2.7
9	1.026	13.00	2.9
10	1.032	13.06	3.1
11	1.037	13.13	3.3
12	1.043	13.21	3.5
13	1.050	13.29	3.6
14	1.047	13.26	3.7
15	1.046	13.24	3.7
16	1.045	13.23	3.7
17	1.045	13.22	3.7

Estão apresentados na tabela 7.6 os valores das potências ativas que estão sendo geradas pelas unidades de GD presentes no alimentador, bem como os nós onde estas unidades estão alocadas.

Tabela 7.6: Valor da potência gerada pela GD.

Nó	Potência Gerada
	(kW)
04	565,3
13	807,3

Os valores de potência demandada são os mesmos, devido às cargas que continuam sendo as mesmas para o sistema. Para os valores de perdas no sistema, tem-se uma diminuição devido à redução dos fluxos nos trechos.

O valor da potência do sistema agora é a soma das perdas com a soma das potências demandadas menos os valores de potência gerada pelas unidades de GD presentes no alimentador.

Inicialmente sem a GD tinha-se uma perda de potência nas linhas de 238,3kW e 67,4kvar. Com a presença da GD, as perdas diminuem para 51kW e 14,4kvar. O valor total que a subestação fornece à rede também diminui devido a presença da GD, sendo anteriormente de 1743,3kW e 807,4kvar e agora de 183,4kW e 754,4kvar. Estes valores podem ser vistos na tabela 7.7.

Tabela 7.7: Valor das potências.

Potência Total		Potências das perdas do alimentador		Potência demanda	
(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)
183,4	754,4	51,0	14,4	1505,0	740,0

A tabela 7.8 apresenta os valores das correntes nos trechos em amperes e em percentual da sua capacidade de corrente, bem como os valores das perdas em cada um dos trechos.

Tabela 7.8: Valor das correntes e perdas nos trechos.

Trecho	I do cabo	I calculado	Utilização do cabo	Perdas	
	(A)	(A)	%	(kW)	(kvar)
1	120	34.98	29.15	6.55	1.85
2	120	32.30	26.91	5.58	1.58
3	120	29.25	24.37	4.58	1.29
4	120	27.78	23.15	4.13	1.17
5	120	27.49	22.90	4.04	1.14
6	120	24.87	20.73	3.31	0.94
7	120	22.82	19.02	2.79	0.79
8	120	16.65	13.88	1.48	0.42
9	120	15.38	12.81	1.26	0.36
10	120	16.48	13.74	1.45	0.41
11	120	17.96	14.97	1.73	0.49
12	120	18.92	15.77	1.92	0.54
13	120	20.65	17.21	2.28	0.64
14	120	14.26	11.88	1.09	0.31
15	120	8.15	6.80	0.36	0.10
16	120	5.52	4.60	0.16	0.05
17	120	2.76	2.30	0.04	0.01

Esta simulação necessitou de 11 iterações para convergir.

7.2.3 Comparação dos gráficos sem GD e com GD

Pode-se analisar na figura 7.2 o perfil de tensão do alimentador radial de 17 nós. A figura 7.2(a) apresenta os perfis de tensão do alimentador sem a presença da GD, onde pode-se observar que a tensão cai sucessivamente em cada um dos nós do sistema. A partir do nó 04 as tensões estão abaixo do valor mínimo estabelecido pela ANEEL.

Já a figura 7.2(b) apresenta os perfis de tensão para o mesmo alimentador com a presença das fontes de GD. Pode-se observar que o nó 13 atingiu o valor máximo permitido pela ANEEL, para tensões em redes de distribuição de 1,05pu. Quando isso ocorre o programa pára de incrementar os valores de potência a serem gerados, encontrando assim o melhor valor para o despacho da potência ativa para o alimentador, fazendo com que o alimentador fique dentro dos parâmetros desejados pelas normas da ANEEL.

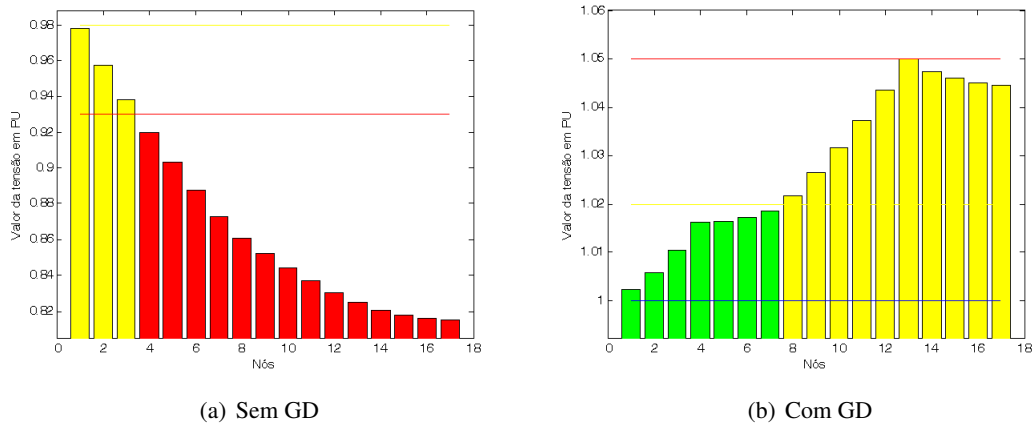


Figura 7.2: Valor da tensão em pu nos nós. Fonte: Programa desenvolvido.

A figura 7.3 apresenta o carregamento em cada um dos trechos em relação ao percentual (%) de utilização do cabo. Como é possível observar, há uma mudança no carregamento dos cabos. Quando não há fontes de GD no alimentador as correntes diminuem ao percorrer o alimentador, já com a presença da GD isso não ocorre mais, podendo haver casos em que a corrente é maior em trechos posteriores.

Pode-se observar isso quando se compara o trecho 09 com o trecho 13, o primeiro tem um carregamento de 15,38% enquanto o segundo tem um carregamento de 26,65% (pode-se fazer este tipo de análise devido ao fato de o alimentador ser radial e ter o mesmo cabo ao longo de toda a extensão).

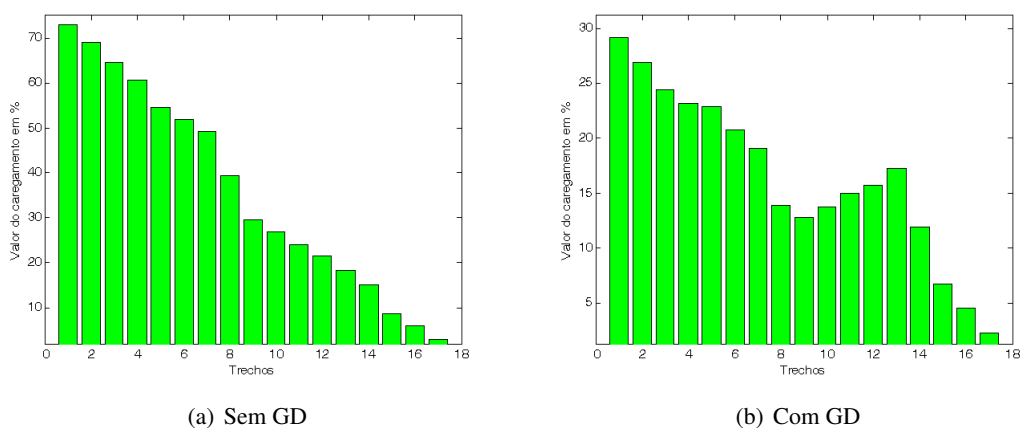


Figura 7.3: Valor do carregamento dos trechos em %. Fonte: Programa desenvolvido.

São apresentados na figura 7.4 os valores e o sentido de fluxos de potência ativos do sistema, quando o valor é negativo (abaixo do eixo x) o sentido do fluxo é reverso, ou seja, voltado para a subestação.

Na figura 7.4(a) como não há fonte de GD, pode-se observar que o fluxo é unidirecional da subestação para as cargas.

Já na figura 7.4(b) as fontes de GD no alimentador, são suficientemente elevadas, propiciando a inversão de fluxo, pode-se observar que a GD no nó 13 tanto é responsável pelo fluxo para a jusante como para a montante de seu nó.

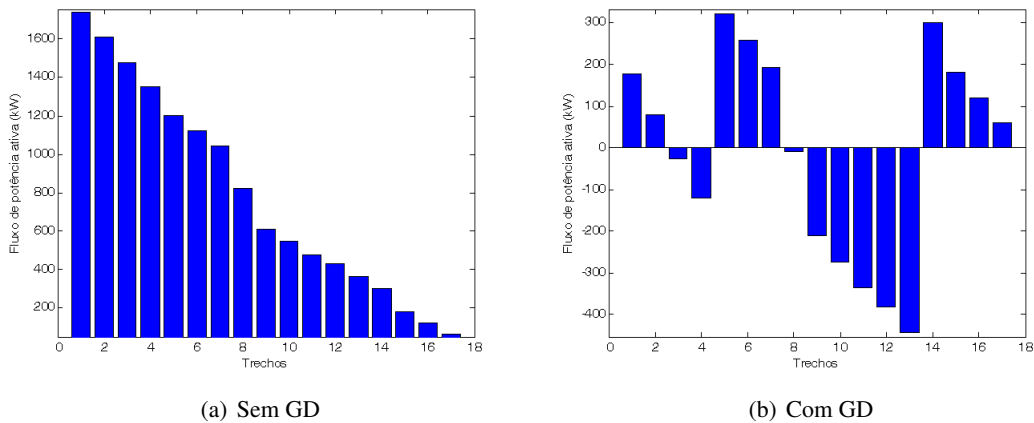


Figura 7.4: Valor e sentido da potência ativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.

A figura 7.5 apresenta os valores e o sentido dos fluxos reativos do alimentador sendo no mesmo sentido para ambos os casos, sem e com a presença da GD. Isso ocorre por não se ter potência reativa fornecida pelos geradores.

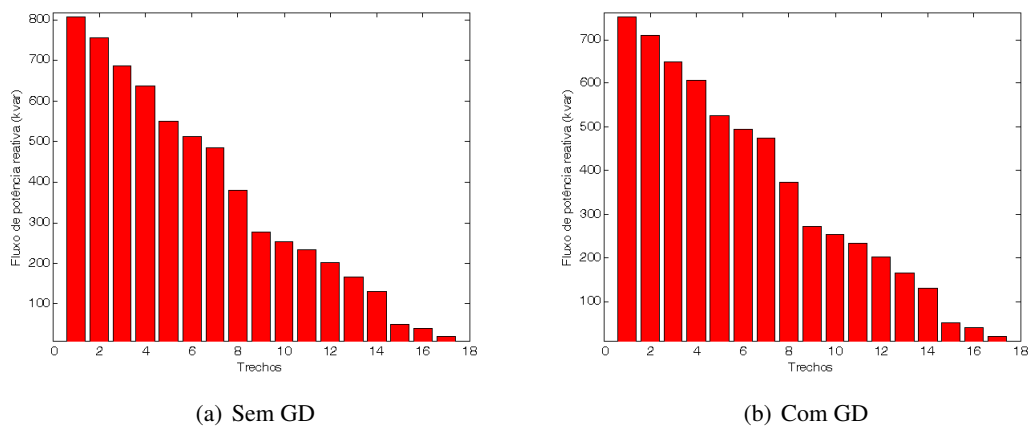


Figura 7.5: Valor e sentido da potência reativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.

7.3 Resultados do sistema teste de 14 nós

O segundo caso a ser analisado é um alimentador com 14 nós com ramais laterais que está representado pela figura 7.6. Os dados referentes a este alimentador estão apresentados no Apêndice B.

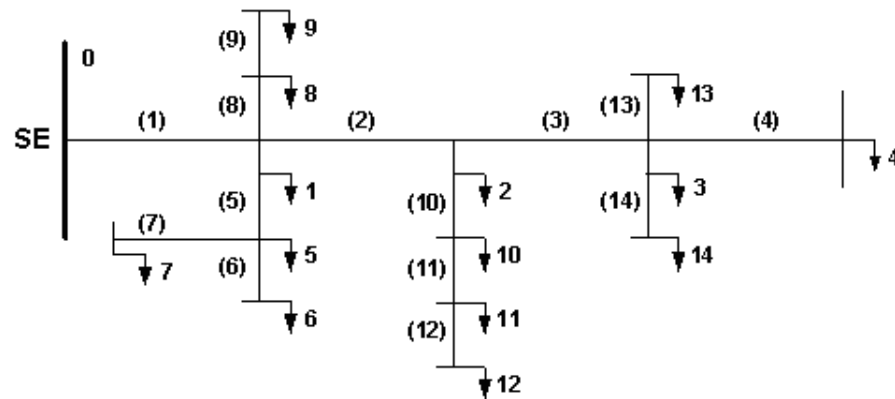


Figura 7.6: Sistema de 14 nós com ramais laterais. Fonte (BARAN; WU, 1989)

7.3.1 Resultado sem a presença da GD

Os resultados para o alimentador de 14 nós com ramais laterais, sem a presença de unidades de GD estão apresentados a seguir.

A tabela 7.9 apresenta os resultados de módulo e ângulo de tensão.

Tabela 7.9: Tensão nos nós.

Nó	Modulo tensão	Modulo tensão	Ângulo
	(pu)	(kV)	(o)
1	0.995	10.94	-0.2
2	0.981	10.79	0.3
3	0.973	10.71	0.6
4	0.972	10.70	0.6
5	0.994	10.93	-0.2
6	0.993	10.92	-0.2
7	0.993	10.93	-0.2
8	0.995	10.94	-0.2
9	0.994	10.93	-0.1
10	0.976	10.74	0.5
11	0.974	10.71	0.5
12	0.974	10.71	0.5
13	0.973	10.70	0.5
14	0.973	10.70	0.5

Para este alimentador tem-se uma carga instalada de 1226,4kW e de 1251,2kvar. As perdas nos cabos das linhas somam, 26,9kW e 17,8kvar, a potência vista pela subestação é de 1277,5kW e 1276,9kvar e estão apresentados na tabela 7.10.

Tabela 7.10: Valor das potências.

Potência Total		Potências das perdas do alimentador		Potência demanda	
(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)
1277.5	1276.9	26.9	17.8	1226.4	1251.2

A tabela 7.11 apresenta os valores das correntes (capacidade e calculada), a utilização do cabo e as perdas de cada trecho.

Tabela 7.11: Valor das correntes e perdas dos trechos.

Trecho	I do cabo	I calculado	Utilização do cabo	Perdas	
	(A)	(A)	%	(kW)	(kvar)
1	670	93.61	13.97	2.76	9.89
2	120	55.27	46.06	16.34	4.62
3	120	30.37	25.31	4.93	1.39
4	120	3.40	2.83	0.06	0.02
5	670	26.42	3.94	0.22	0.79
6	670	10.57	1.58	0.04	0.13
7	670	5.28	0.79	0.01	0.03
8	670	8.61	1.28	0.02	0.08
9	120	3.33	2.77	0.06	0.02
10	120	19.54	16.29	2.04	0.58
11	120	8.79	7.32	0.41	0.12
12	670	3.40	0.51	0.00	0.01
13	670	5.39	0.81	0.01	0.03
14	670	10.79	1.61	0.04	0.13

Foram necessárias 3 iterações para se atingir a convergência.

7.3.2 Resultado com a presença da GD

Para as simulações deste sistema teste foi prevista a inserção de duas fontes de GD, sendo uma alocada no nó 07 e a outra no nó 12.

Com estes dados de entrada o programa apresenta na tabela 7.12, os valores de modulo e ângulo de tensão, como resultado do FPO com maximização da potência ativa gerada pela GD nos nós 07 e 12.

Tabela 7.12: Tensão nos nós.

Nó	Modulo tensão	Modulo tensão	Ângulo
	(pu)	(kV)	(o)
1	0.997	10.97	0.2
2	1.012	11.13	1.1
3	1.004	11.05	1.4
4	1.004	11.04	1.4
5	0.997	10.96	0.3
6	0.996	10.96	0.2
7	0.997	10.97	0.3
8	0.996	10.95	0.2
9	0.995	10.94	0.3
10	1.023	11.25	1.8
11	1.049	11.53	2.3
12	1.050	11.55	2.6
13	0.992	10.91	1.4
14	0.991	10.90	1.4

Para este caso as unidades geradoras fornecem 357kW no nó 07 e de 1955,8kW no nó 12, conforme indicado na tabela 7.13.

Tabela 7.13: Valor da potência gerada pela GD.

Nó	Potência Gerada
	(kW)
07	357,0
12	1955,8

Inicialmente sem a GD tinha-se uma perda de potência nas linhas de 26,9kW e 17,8kvar. Com a presença da GD estes valores de perda agora são de 130,4kW e de 148,5kvar sendo este aumento no valor da perda causado pelo aumento de corrente nos trechos. O valor total fornecido à rede sem a GD é de 1277,5kW e 1276,9kvar agora é de -955,9kW e 1399,7kvar. O valor negativo da potência ativa total indica que a subestação está absorvendo este valor de potência do alimentador.

Tabela 7.14: Valor das Potências.

Potência Total		Potências das perdas do alimentador		Potência demanda	
(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)
-955.9	1399.7	130.4	148.5	1226.4	1251.2

No primeiro trecho a corrente era de 93,61A sem a GD (tabela 7.11). Na presença de GD a corrente passa a ser de 85,05A neste trecho (tabela 7.15). Já no trecho 10 a corrente de 19,54A aumenta para 86,06A por causa da elevada injeção de geração permitida.

Tabela 7.15: Valor das correntes e perdas dos trechos.

Trecho	I do cabo	I calculado	Utilização do cabo	Perdas	
	(A)	(A)	%	(kW)	(kvar)
1	670	85.08	12.70	2.28	8.16
2	120	71.52	59.60	27.36	7.73
3	120	29.43	24.52	4.63	1.31
4	120	3.29	2.75	0.06	0.02
5	670	18.83	2.81	0.11	0.40
6	670	10.54	1.57	0.03	0.13
7	670	15.56	2.32	0.08	0.27
8	670	8.59	1.28	0.02	0.08
9	120	3.32	2.77	0.06	0.02
10	120	86.06	71.71	39.61	11.20
11	120	92.26	76.88	45.53	12.87
12	670	95.59	14.27	2.88	10.31
13	670	5.29	0.79	0.01	0.03
14	670	10.59	1.58	0.04	0.13

Para se alcançar a convergência foram necessárias 601 iterações.

7.3.3 Comparação dos gráficos sem GD e com GD

Pode-se analisar na figura 7.7 o perfil de tensão do alimentador de 14 nós com ramos laterais, onde a figura 7.7(a) apresenta os perfis de tensão do alimentador sem a presença das fontes de GD. Nesta figura, pode-se observar que todos os nós apresentam valores aceitáveis de tensão.

Já a figura 7.7(b) apresenta os perfis de tensão do alimentador com a presença das fontes de GD. Pode-se observar que o nó 12 atinge o valor máximo permitido para tensões em redes de distribuição que é de 1,05pu, pois é neste nó que ocorre a máxima injeção de potência ativa.

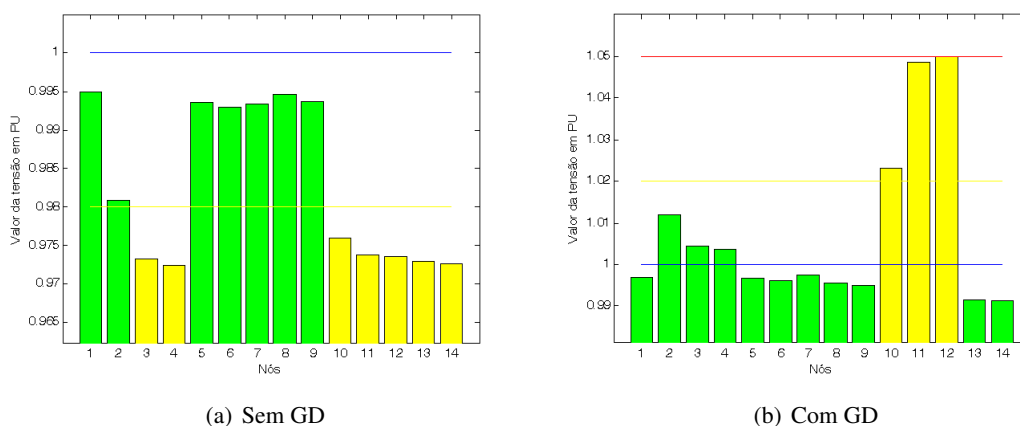


Figura 7.7: Valor da tensão em pu nos nós. Fonte: Programa desenvolvido.

A figura 7.8 apresenta o carregamento em cada um dos trechos em relação ao percentual (%) de utilização do cabo. Como se pode observar, há uma mudança considerável no carregamento em alguns trechos dos cabos.

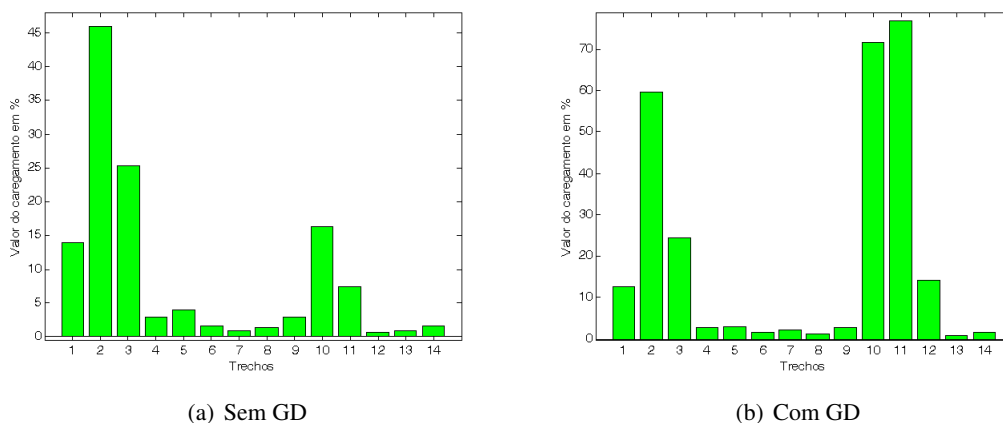


Figura 7.8: Valor do carregamento dos trechos em %. Fonte: Programa desenvolvido.

A figura 7.9 apresenta os valores e o sentido de fluxos ativos do sistema. Na figura 7.9(a), como não se tem fonte de geração, pode-se observar que todo o fluxo sai da subestação no sentido das cargas. Pode-se verificar que nos trechos que alimentam uma maior carga (linha principal) o fluxo é elevado. Já na figura 7.9(b), tem-se fontes de GD aplicadas no alimentador, cuja geração elevada causa fluxos reversos.

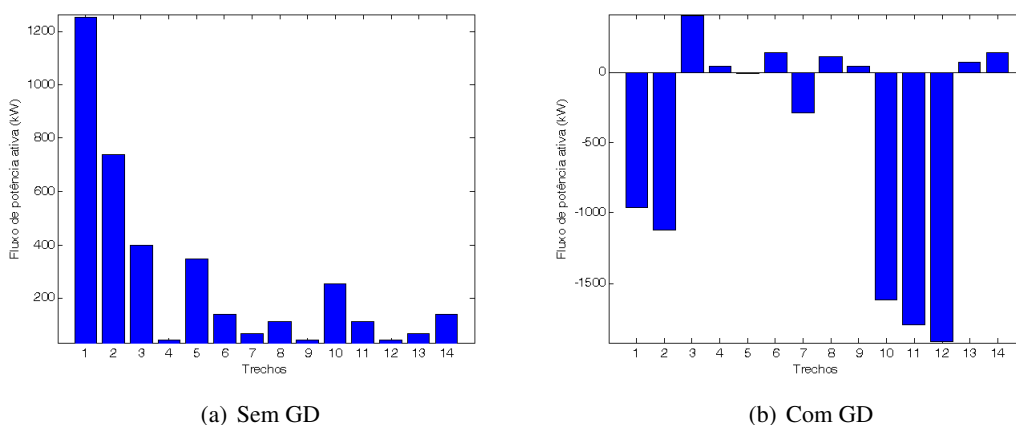


Figura 7.9: Valor e sentido da potência ativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.

A figura 7.10 apresenta os valores e os sentido de fluxos reativos do alimentador praticamente iguais e unidirecionais. Isso ocorre devido ao fato de não haver despacho de potência reativa pelos geradores.

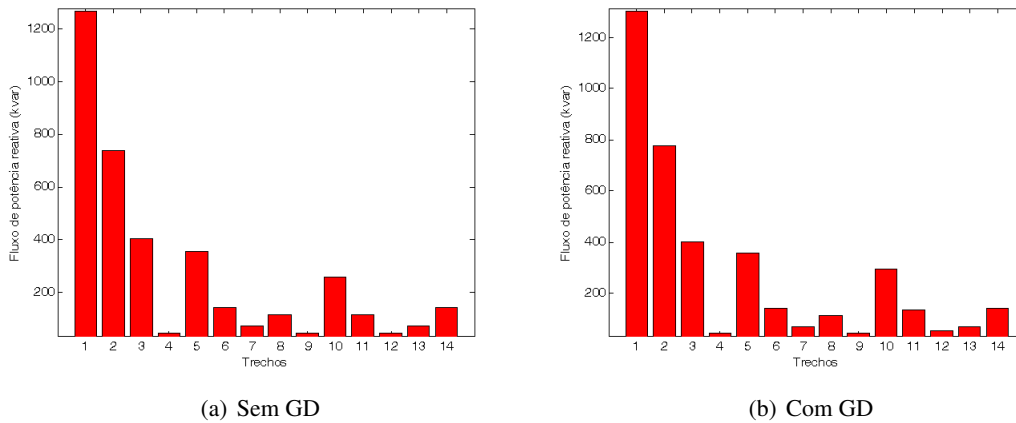


Figura 7.10: Valor e sentido da potência reativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.

7.4 Resultados do sistema real de 16 nós

Com a intenção de aplicar o programa desenvolvido em um sistema real para avaliar o seu desempenho, foi escolhido um alimentador real da distribuidora CELESC, que contém 331 nós, representado na figura 7.11.

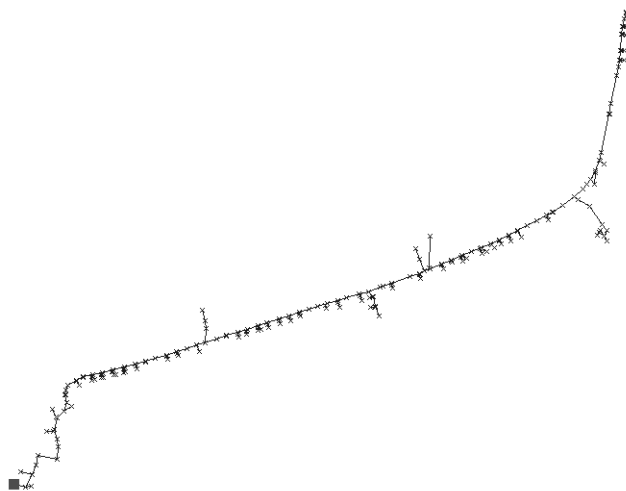


Figura 7.11: Alimentador real. Fonte: (ARANHA NETO, 2006).

Este alimentador de 331 nós foi reduzido para um sistema de 16 nós conforme a figura 7.12, cujos dados estão apresentados no Apêndice C.

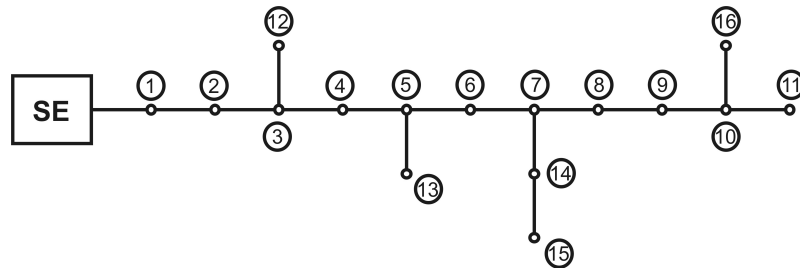


Figura 7.12: Alimentador real resumido para 16 nós. Fonte: (ARANHA NETO, 2006).

7.4.1 Resultado sem a presença da GD

Os resultados para o alimentador real de 16 nós com ramais laterais, sem a presença de unidades de GD estão apresentados abaixo.

Os valores dos módulos e ângulos das tensões do alimentador analisado estão presentes na tabela 7.16.

Tabela 7.16: Tensão nos nós.

Nó	Modulo tensão	Modulo tensão	Ângulo
	(pu)	(kV)	(o)
1	0.984	13.57	-0.6
2	0.968	13.35	-1.2
3	0.953	13.15	-1.8
4	0.938	12.94	-2.3
5	0.925	12.77	-2.6
6	0.914	12.62	-3.0
7	0.903	12.46	-3.3
8	0.899	12.40	-3.4
9	0.895	12.35	-3.5
10	0.893	12.32	-3.6
11	0.892	12.31	-3.6
12	0.953	13.15	-1.8
13	0.925	12.77	-2.7
14	0.896	12.37	-3.5
15	0.889	12.27	-3.7
16	0.893	12.32	-3.6

Os valores abaixo do nível mínimo de tensão são apresentados na tabela 7.17. Pode-se verificar que há um total de 11 nós com tensão inferior ao valor mínimo aceitável.

Tabela 7.17: Nós com tensão abaixo de 0,93pu.

Nó	Modulo tensão	Modulo tensão
	(pu)	(kV)
5	0.925	12.77
6	0.914	12.62
7	0.903	12.46
8	0.899	12.40
9	0.895	12.35
10	0.893	12.32
11	0.892	12.31
13	0.925	12.77
14	0.896	12.37
15	0.889	12.27
16	0.893	12.32

Os valores referentes às correntes de cada trecho do alimentador são apresentados na tabela 7.18 em termos de valores absolutos e em termos de valores percentuais(%), assim como os valores de perdas nos trechos.

Tabela 7.18: Valor das correntes e perdas das linhas.

Trecho	I do cabo	I calculado	Utilização do cabo	Perdas	
	(A)	(A)	%	(kW)	(kvar)
1	314	298.66	95.11	79.48	113.46
2	314	296.31	94.36	78.23	111.68
3	314	277.97	88.53	68.85	98.28
4	314	255.20	81.27	58.03	82.84
5	314	210.41	67.01	39.45	56.32
6	314	195.61	62.30	34.09	48.67
7	314	193.38	61.59	33.32	47.57
8	314	69.76	22.22	4.34	6.19
9	314	57.81	18.41	2.98	4.25
10	314	35.08	11.17	1.10	1.57
11	203	9.66	4.76	0.07	0.03
12	203	0.99	0.49	0.00	0.00
13	314	5.92	1.89	0.03	0.04
14	314	111.72	35.58	11.12	15.88
15	314	111.72	35.58	11.12	15.88
16	203	2.64	1.30	0.01	0.01

A tabela 7.19 apresenta para este alimentador uma carga instalada de 6161,7kW e de 2156,1kvar. Tem-se como perdas no sistema nos cabos das linhas os valores de, 422,3kW e 602,8kvar, a potência vista pela subestação é de 6584kW e 2758,9kvar.

Tabela 7.19: Valor das potências.

Potência Total		Potências das perdas do alimentador		Potência demanda	
(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)
6584.0	2758.9	422.3	602.8	6161.7	2156.1

Foram necessárias 5 iterações para se atingir a convergência.

7.4.2 Resultado com a presença da GD

Para as simulações deste sistema real da CELESC foram previstos dois casos, o primeiro com uma fonte de GD alocada no nó 10 e o segundo com duas fontes no alimentador, mantendo o gerador do nó 10 e inserindo uma outra no nó 05.

7.4.2.1 Presença de uma fonte de GD

A tabela 7.20 apresenta os valores de modulo e ângulo de tensão, como resultado do FPO com maximização da potência ativa gerada pela GD no nó 10.

Tabela 7.20: Tensão nos nós.

Nó	Modulo tensão	Modulo tensão	Ângulo
	(pu)	(kV)	(o)
1	1.000	13.80	0.3
2	1.000	13.80	0.7
3	1.002	13.83	1.0
4	1.004	13.86	1.6
5	1.009	13.92	2.1
6	1.014	13.99	2.8
7	1.019	14.07	3.4
8	1.029	14.20	4.2
9	1.039	14.34	5.0
10	1.050	14.49	5.8
11	1.049	14.48	5.8
12	0.999	13.79	1.0
13	0.999	13.79	2.1
14	0.995	13.73	3.2
15	0.990	13.66	3.1
16	0.999	13.78	5.8

Pode-se verificar na tabela 7.21 que a unidade geradora fornece 7255,6kW no nó 10 .

Tabela 7.21: Valor da potência gerada pela GD.

Nó	Potência Gerada
	(kW)
10	7255.6

No sistema sem a GD, tinha-se uma perda de potência nas linhas de 422,3kW e 602,8kvar. Com a presença da GD este valores de perda são de 1016,9kW e de 1095,2kvar sendo este aumento no valor da perda causado pelo aumento de corrente nos trechos. O valor total fornecido à rede sem a GD é de 6584kW e 2758,9kvar e com a GD e de -77kW e 3251,4kvar. O valor negativo da potência ativa total indica que a subestação está absorvendo este valor de potência do alimentador.

Tabela 7.22: Valor das potências.

Potência Total		Potências das perdas do alimentador		Potência demanda	
(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)
-77.0	3251.4	1016.9	1095.2	6161.7	2156.1

A tabela 7.23 mostra os valores das correntes nos trechos em amperes e em percentual de sua capacidade de corrente, bem como os valores das perdas em cada um dos trechos.

Tabela 7.23: Valor das correntes e perdas nos trechos.

Trecho	I do cabo	I calculado	Utilização do cabo	Perdas	
	(A)	(A)	%	(kW)	(kvar)
1	314	113.30	36.08	11.44	16.33
2	314	112.22	35.74	11.22	16.02
3	314	109.27	34.80	10.64	15.19
4	314	151.88	48.37	20.55	29.34
5	314	160.29	51.05	22.89	32.68
6	314	164.78	52.48	24.19	34.54
7	314	174.29	55.51	27.07	38.64
8	314	241.07	76.77	51.78	73.92
9	314	248.57	79.16	55.05	78.59
10	314	263.88	84.04	62.04	88.57
11	203	8.21	4.05	0.02	0.09
12	203	0.94	0.46	0.00	0.00
13	314	5.49	1.75	0.03	0.04
14	314	100.51	32.01	9.00	12.85
15	314	100.36	31.96	8.97	12.81
16	203	2.36	1.16	0.01	0.01

Para a convergência desta simulação foram necessárias 12 iterações.

7.4.2.2 Presença de duas fontes de GD

Pode-se verificar pela tabela 7.24 que os valores das tensões em cada um dos nós é maior do que os valores apresentados anteriormente, isso se deve ao fato do auxílio da GD no alimentador.

Tabela 7.24: Tensão nos nós.

Nó	Modulo tensão	Modulo tensão	Ângulo
	(pu)	(kV)	(o)
1	1.003	13.84	0.6
2	1.007	13.90	1.2
3	1.012	13.97	1.8
4	1.018	14.05	2.6
5	1.026	14.16	3.4
6	1.028	14.18	3.7
7	1.029	14.21	4.1
8	1.036	14.29	4.6
9	1.042	14.39	5.2
10	1.050	14.49	5.7
11	1.049	14.48	5.7
12	1.000	13.80	1.8
13	0.999	13.79	3.4
14	0.995	13.73	3.9
15	0.990	13.67	3.8
16	0.999	13.79	5.7

A tabela 7.25 apresenta os valores das potências ativas que estão sendo geradas pelas unidades de GD presentes no alimentador, bem como os nós onde estas unidades estão alocadas.

Tabela 7.25: Valor das potências geradas pela GD.

Nó	Potência Gerada
	(kW)
05	4068,5
10	5234,2

Inicialmente sem a GD tinha-se uma perda de potência nas linhas de 422,3kW e 602,8kvar. Com a presença da GD este valor de perda agora é de 1257,5 kW e de 1423,2kvar (este aumento no valor da perda se dá devido ao aumento de corrente nas linhas). O valor total que a subestação enxerga do sistema sem a GD era de 6584kW e 2758,9kvar agora é de -1883,5kW e 3579,3kvar. O valor negativo da potência do sistema indica que a subestação está absorvendo este valor de potência ativa do alimentador.

Tabela 7.26: Valor das potências.

Potência Total		Potências das perdas do alimentador		Potência demanda	
		(kW)	(kvar)	(kW)	(kvar)
-1883.5	3579.3	1257.5	1423.2	6161.7	2156.1

A tabela 7.23 mostra os valores das correntes nos trechos em amperes e em percentual de sua capacidade de corrente, bem como os valores das perdas em cada um dos trechos.

Tabela 7.27: Valor das correntes e perdas nos trechos.

Linha	I do cabo	I calculado	Utilização do cabo	Perdas	
	(A)	(A)	%	(kW)	(kvar)
1	314	159.78	50.89	22.75	32.47
2	314	159.77	50.88	22.74	32.47
3	314	165.80	52.80	24.49	34.97
4	314	210.54	67.05	39.50	56.39
5	314	230.49	73.40	47.34	67.58
6	314	101.61	32.36	9.20	13.13
7	314	111.74	35.59	11.12	15.88
8	314	161.00	51.27	23.10	32.97
9	314	168.42	53.64	25.27	36.08
10	314	183.54	58.45	30.01	42.85
11	203	8.21	4.05	0.02	0.09
12	203	0.94	0.46	0.00	0.00
13	314	5.48	1.75	0.03	0.04
14	314	100.47	32.00	8.99	12.84
15	314	100.32	31.95	8.97	12.80
16	203	2.36	1.16	0.01	0.01

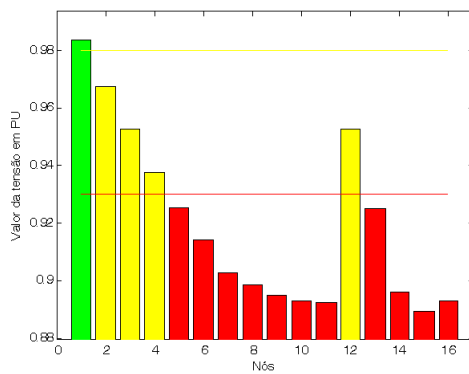
Esta simulação necessitou de 12 iterações para convergir.

7.4.3 Comparação dos gráficos sem GD e com GD

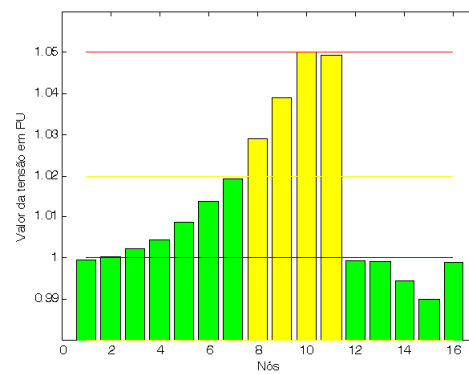
Pode-se analisar na figura 7.13 o perfil de tensão do alimentador de 16 nós com ramos laterais, onde a figura 7.13(a) apresenta os perfis de tensão do alimentador sem a presença das fontes de GD.

A figura 7.13(b) apresenta os perfis de tensão do alimentador com a presença de uma fonte de GD. Pode-se observar que o nó 10 atinge o valor máximo permitido para tensões em redes de distribuição.

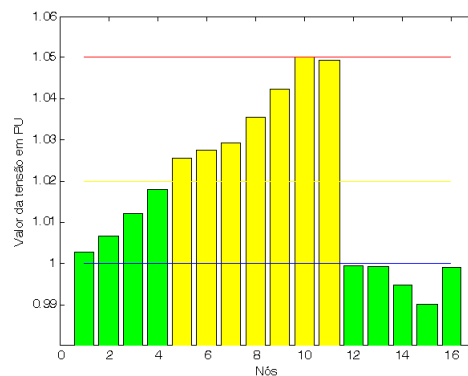
E por último a figura 7.13(c) apresenta os perfis de tensão do alimentador com a presença de duas fontes de GD. Pode-se observar que o nó 10 atinge o valor máximo permitido para tensões em redes de distribuição



(a) Sem GD



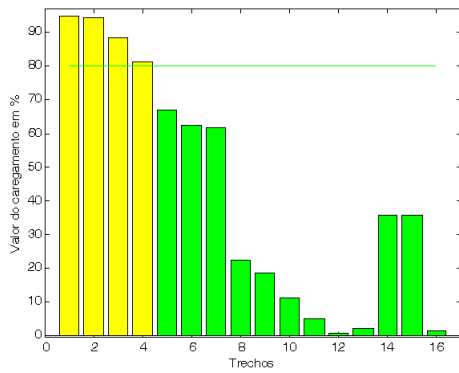
(b) Com uma fonte de GD



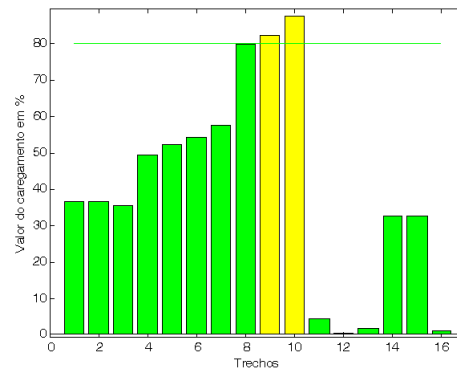
(c) Com duas fontes de GD

Figura 7.13: Valor da tensão em pu nos nós. Fonte: Programa desenvolvido.

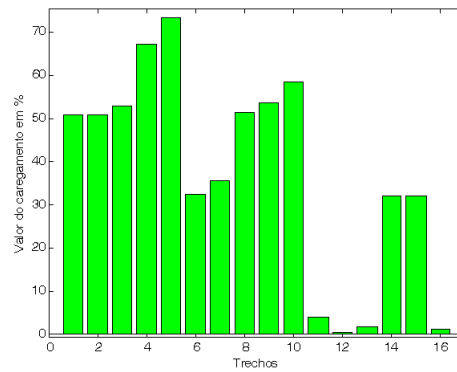
Na figura 7.14 pode-se observar que há uma mudança no carregamento dos cabos, para cada um dos três gráficos.



(a) Sem GD



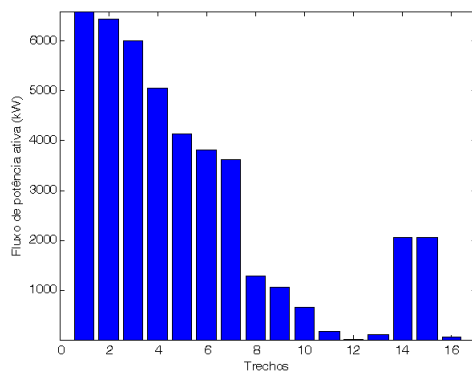
(b) Com uma fonte de GD



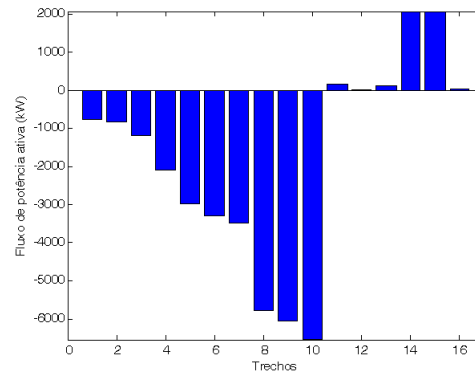
(c) Com duas fonte de GD

Figura 7.14: Valor do carregamento dos trechos em %. Fonte: Programa desenvolvido.

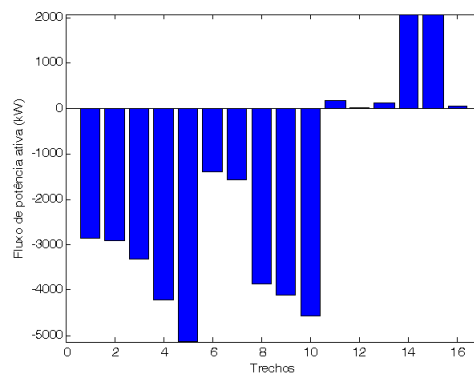
A figura 7.15 apresenta os valores e o sentido de fluxos ativos do sistema. Na figura 7.15(a), como não há fonte de GD, pode-se observar que todo o fluxo sai da subestação no sentido das cargas. Já nas figuras 7.15(b) e 7.15(c), como há fontes de GD conectadas ao alimentador, a geração elevada causa fluxos reversos.



(a) Sem GD



(b) Com uma fonte de GD



(c) Com duas fonte de GD

Figura 7.15: Valor e sentido da potência ativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.

A figura 7.16 apresenta os valores e o sentido de fluxos reativos do alimentador no mesmo sentido para todos os casos, sem GD, com uma fonte de GD e com duas fontes de GD. Isso ocorre por não haver potência reativa fornecida pelos geradores.

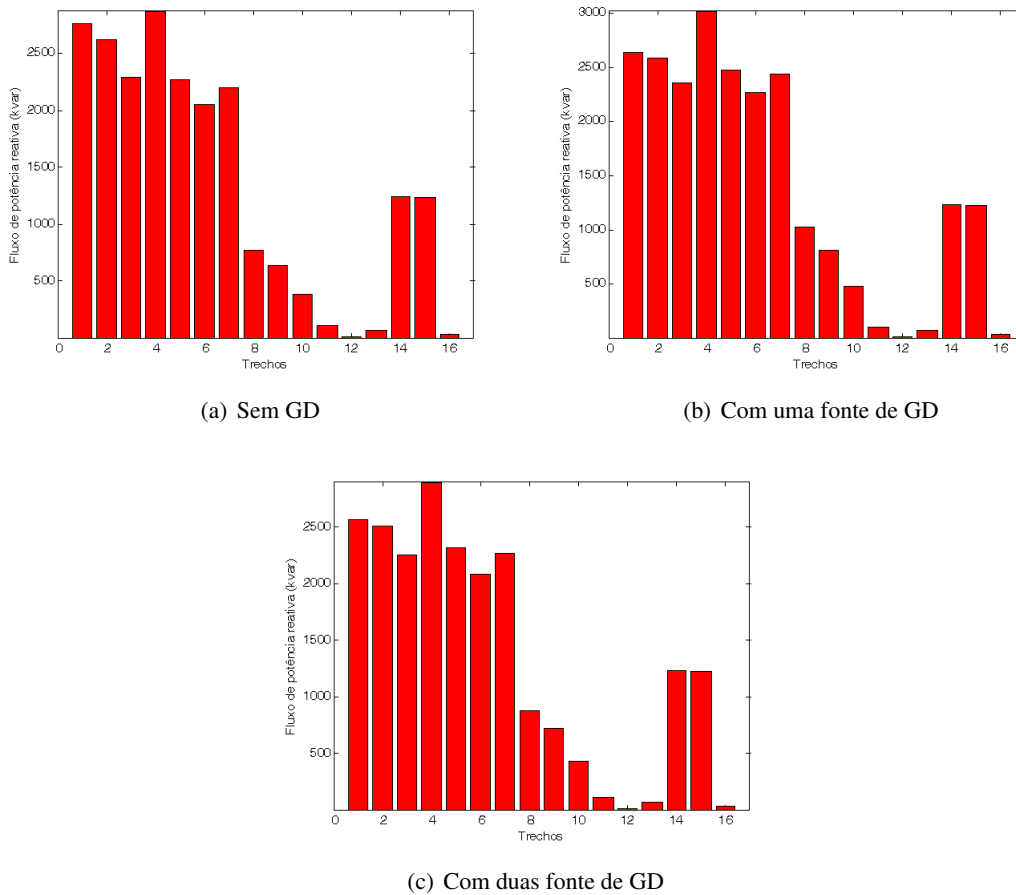


Figura 7.16: Valor e sentido da potência reativa nos trechos. Fonte: Programa desenvolvido.

7.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados da maximização da potência ativa gerada em determinados nós de três redes de distribuição. Os resultados foram comparados ao desempenho das redes sem a presença da GD, mostrando que há melhoras no perfil de tensão e possíveis alívios de carregamento das redes, permitindo postergar investimentos de reforço. O desempenho do aplicativo computacional desenvolvido se mostrou satisfatório, convergindo em todos os casos analisados.

Sendo assim tem-se disponível uma ferramenta computacional capaz de avaliar a capacidade de GD possível de ser implantada em redes existentes, auxiliando a fase de estudos elétricos de implantação. Por outro lado, permite também que se avaliem cenários de operação da rede de distribuição com a presença de GD

Capítulo 8

Considerações Finais

8.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas e discutidas as conclusões referentes à metodologia, programa e os resultados obtidos para o despacho de potência ativa em redes de distribuição de energia com fontes de GD, levando-se em conta os perfis de tensão da rede. Também serão apresentadas algumas idéias para trabalhos futuros.

8.2 Conclusão

O crescente aumento da demanda e os altos custos na construção de novas unidades geradoras, o esgotamento das grandes fontes primárias e os grandes problemas ambientais causados por estas construções fazem com que a Geração Distribuída esteja cada dia mais presente em nossos sistemas e conectadas à rede local, seja ela de distribuição, subtransmissão ou mesmo de transmissão.

Com a conexão destas fontes nas redes locais, tem-se a necessidade de se realizar diversos estudos referentes aos impactos que estas fontes podem causar nas redes.

Devido a esta necessidade foi pensada e proposta para esta dissertação a elaboração de uma ferramenta que fosse capaz de avaliar qual seria o impacto da entrada destas fontes de geração distribuída no perfil de tensão das redes.

Para realizar este estudo foi elaborado um algoritmo de Fluxo de Potência Ótimo via Método dos Pontos Interiores baseado no Método das Somas das Potências que fosse capaz de maximizar a geração de potência ativa gerada pelas unidades de GD presentes na rede de distribuição, sujeita a restrições de igualdade que é o balanço da potência ($V_i^4 + A_i * V_i^2 + B_i = 0$) em cada nó; restrições de caixa referente aos níveis máximos e mínimos de potência ativa gerada ($Pg_i^{min} \leq Pg_i \leq Pg_i^{Max}$) e restrições de caixa referente aos níveis de tensão máximo e mínimo ($V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{Max}$).

Afim de analisar a viabilidade deste algoritmo desenvolvido, o mesmo foi aplicado em três sistemas de distribuição, sendo dois sistemas testes e um sistema real da CELESC. Os resultados foram obtidos com estas simulações e comparados ao desempenho das redes sem a presença da GD, mostrando em todos os casos que há melhorias no perfil de tensão e possíveis alívios de carregamento das redes, permitindo postergar investimentos de reforço nos dados alimentadores, por parte das concessionárias.

A ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho de mestrado poderá ter múltiplas utilidades, seja em planejamento de inserção de GD em redes de distribuição, como na operação de rede na presença de GD. Neste caso pode-se limitar o despacho de GD frente às limitações impostas pela rede em diversos cenários de carga.

8.3 Sugestões para trabalhos futuros

Como em qualquer tipo de trabalho sempre há algo que pode ser melhorado, e no decorrer desta dissertação alguns pontos foram levantados e estão sugeridos a seguir:

1. Tendo em vista o bom desempenho do método usado nesta dissertação sugere-se a utilização da abordagem multi-objetiva para incluir no programa outras funções objetivo, tais como inclusão do despacho de potência reativa.
2. Incluir no problema se for o caso o despacho de banco de capacitores para auxiliar os geradores quanto a potência reativa;
3. Incluir limites de fluxo de potência em cada uma das linhas.
4. Aplicar o programa considerando a variação de demanda e verificar o desempenho da GD.
5. Modelar os reguladores de tensão presentes nas redes de distribuição;
6. Finalmente recomenda-se que seja implementada esta metodologia desenvolvida, em um ambiente mais favorável (amigável) para o usuário que não seja o MATLAB, mas sim em um ambiente de linguagem de programação visual tais como: Delphi, C++ Builder, ou outras.

Apêndice A

Sistema teste de 17 nós

O primeiro caso simulado pelo programa foi o de 17 barras sem ramais laterais (figura A.2) que é a parte central do alimentador de 32 barras com ramais laterais apresentado por Baran e Wu (1989), conforme apresentado na figura A.1.

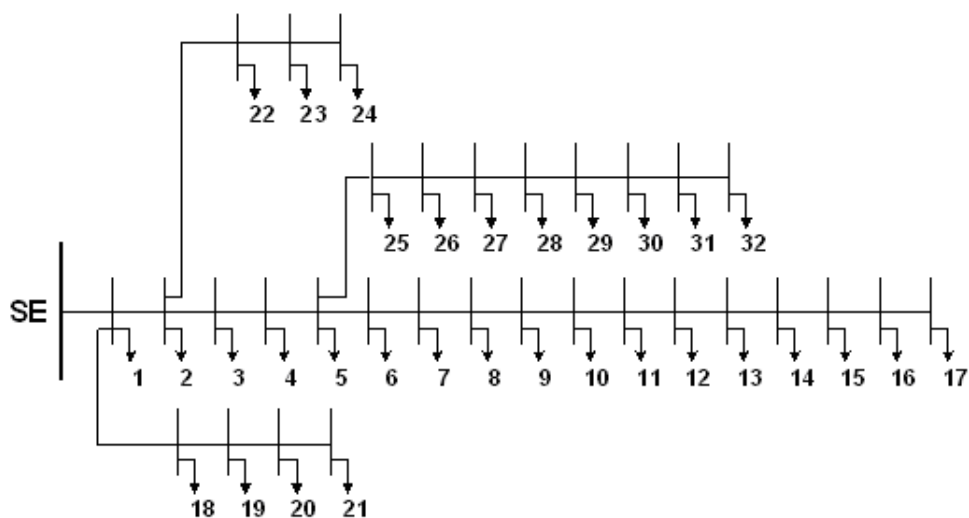


Figura A.1: Sistema de 32 nós. Fonte (BARAN; WU, 1989)



Figura A.2: Sistema de 17 nós sem ramais laterais. Fonte (BARAN; WU, 1989)

A.1 Dados do sistema

Os dados do sistema são apresentados nas tabelas abaixo, sendo que a tabela A.1 apresenta os valores das linhas, tais como resistência e reatância dos cabos utilizados, comprimento das linhas e outros dados; a tabela A.3 apresenta os valores referentes a subestação, tais como tensão e ângulo. A tabela A.2 apresenta os valores das cargas.

Tabela A.1: Dados do alimentador de 17 nó sem ramais laterais.

Ramo No.	Bus (I)	Bus (J)	JC = 1 JNC = 0	Resistência (Ohms/km)	Reatância (Ohms/km)	Imped.	Comp. (km)
1	0	1	1	0,0922	0,047	0,103	1.00
2	1	2	1	0,493	0,2511	0,553	1.00
3	2	3	1	0,366	0,1864	0,411	1.00
4	3	4	1	0,3811	0,1941	0,428	1.00
5	4	5	1	0,819	0,707	1,082	1.00
6	5	6	1	0,1872	0,6188	0,646	1.00
7	6	7	1	0,7114	0,2351	0,749	1.00
8	7	8	1	1,03	0,74	1,268	1.00
9	8	9	1	1,044	0,74	1,280	1.00
10	9	10	1	0,1966	0,065	0,207	1.00
11	10	11	1	0,3744	0,1238	0,394	1.00
12	11	12	1	1,468	1,155	1,868	1.00
13	12	13	1	0,5416	0,7129	0,895	1.00
14	13	14	1	0,591	0,526	0,791	1.00
15	14	15	1	0,7463	0,545	0,924	1.00
16	15	16	1	1,289	1,721	2,150	1.00
17	16	17	0	0,732	0,574	0,930	1.00

Tabela A.2: Dados do alimentador de 17 nó sem ramais laterais.

Bus	Pot. Ativa (kW)	Pot. Reativa (kvar)	Pot. Aparente (kva)	FP
1	90,00	40	98,49	0,91381
2	100,00	60	116,62	0,85749
3	90,00	40	98,49	0,91381
4	120,00	80	144,22	0,83205
5	60,00	30	67,08	0,89443
6	60,00	20	63,25	0,94868
7	200,00	100	223,61	0,89443
8	200,00	100	223,61	0,89443
9	60,00	20	63,25	0,94868
10	60,00	20	63,25	0,94868
11	45,00	30	54,08	0,83205
12	60,00	35	69,46	0,86378
13	60,00	35	69,46	0,86378
14	120,00	80	144,22	0,83205
15	60,00	10	60,83	0,98639
16	60,00	20	63,25	0,94868
17	60,00	20	63,25	0,94868

Tabela A.3: Dados do alimentador de 17 nó sem ramais laterais.

Bus Slack	Tensão Base (kV)	Ângulo	Tensão (pu)
0	12.66	0.00	1.00000

Apêndice B

Sistema teste de 14 barras

Como sistema teste de 14 nós é utilizado o alimentador apresentado por (DAS; KOTHARI; KALAM, 1995); e representado na figura B.1.

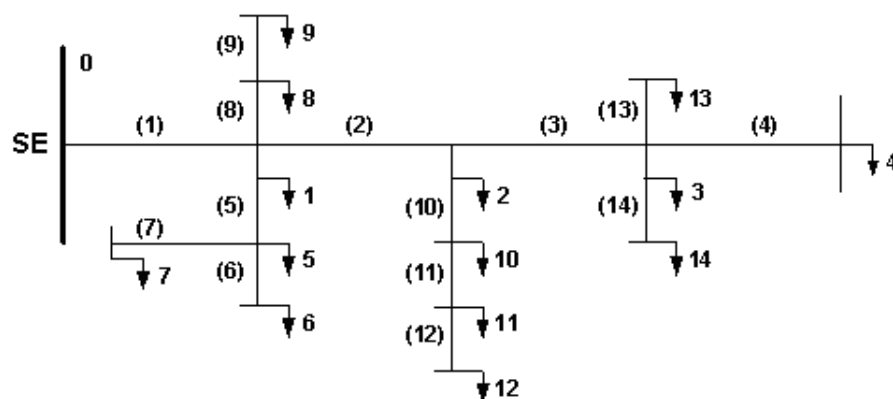


Figura B.1: Sistema de 14 nós sem ramais laterais. Fonte (DAS; KOTHARI; KALAM, 1995)

B.1 Dados do sistema

Os dados do sistema são apresentados nas tabelas abaixo, onde a tabela B.1 apresenta os valores das linhas, tais como resistência e reatância dos cabos utilizados, comprimento das linhas e outros dados; a tabela B.2 apresenta os valores referentes a subestação, tais como tensão e ângulo, enquanto a tabela C.1 apresenta os valores das cargas.

Tabela B.1: Dados do alimentador de 17 nós sem ramais laterais.

Ramo No.	Bus (I)	Bus (J)	JC = 1 JNC = 0	Resistência (Ohms/km)	Reatância (Ohms/km)	Imped.	Comp. (km)
1	0	1	1	1,353	1,323	1,893	1.00
2	1	2	1	1,170	1,145	1,637	1.00
3	2	3	1	0,841	0,823	1,177	1.00
4	3	4	0	1,523	1,028	1,838	1.00
5	1	5	1	2,557	1,725	3,085	1.00
6	5	6	0	1,088	0,734	1,313	1.00
7	5	7	0	1,251	0,844	1,509	1.00
8	1	8	1	2,013	1,358	2,428	1.00
9	8	9	0	1,687	1,358	2,165	1.00
10	2	10	1	1,796	1,211	2,166	1.00
11	10	11	1	2,448	1,652	2,953	1.00
12	11	12	0	2,013	1,358	2,428	1.00
13	3	13	0	2,231	1,505	2,691	1.00
14	3	14	0	1,197	0,807	1,444	1.00

Tabela B.2: Dados do alimentador de 17 nós sem ramais laterais.

Bus Slack	Tensão Base (kV)	Ângulo	Tensão (pu)
0	11.00	0.00	1.00000

Tabela B.3: Dados do alimentador de 17 nós sem ramais laterais.

Bus	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kvar)	Potência Aparente (kva)	FP
1	44,1	44,99	63	0,70
2	70	71,41	100	0,70
3	140	142,83	200	0,70
4	44,1	44,99	63	0,70
5	140	142,83	200	0,70
6	140	142,83	200	0,70
7	70	71,41	100	0,70
8	70	71,41	100	0,70
9	44,1	44,99	63	0,70
10	140	142,83	200	0,70
11	70	71,41	100	0,70
12	44,1	44,99	63	0,70
13	70	71,41	100	0,70
14	140	142,83	200	0,70

Apêndice C

Sistema Real de 16 nós

A figura C.1 apresenta o desenho de um alimentador real de uma concessionária brasileira de energia elétrica.

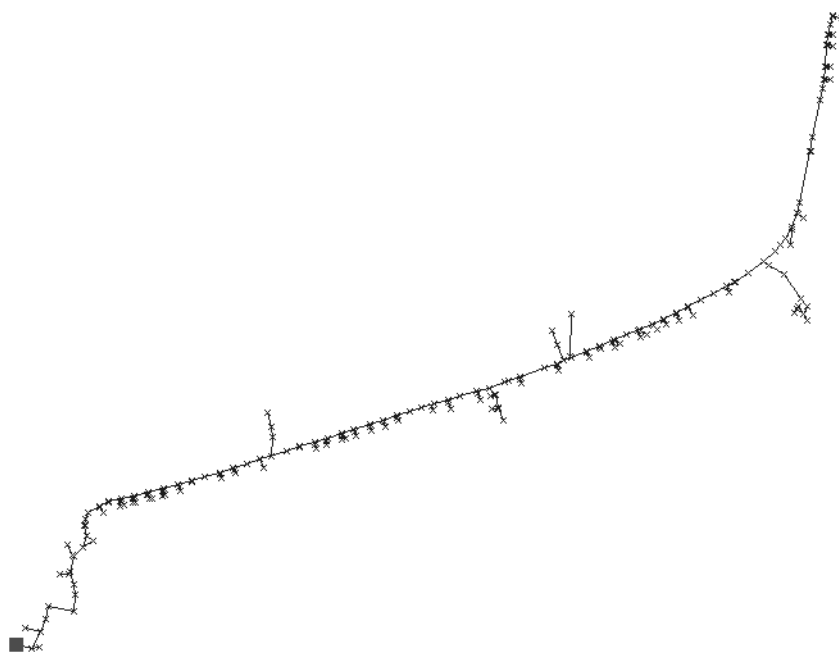


Figura C.1: Alimentador real. Fonte: (ARANHA NETO, 2006).

Como sistema real de 16 nós utilizado para as simulações deste trabalho esta apresentado pela figura C.1.

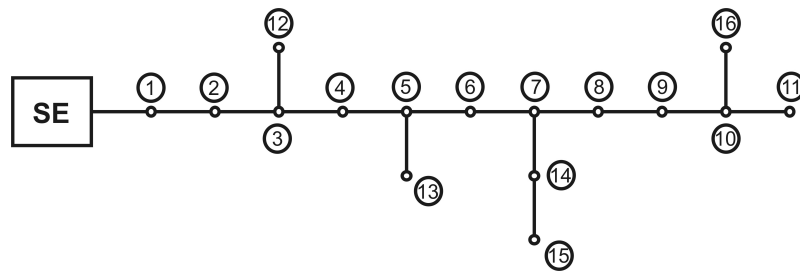


Figura C.2: Alimentador real resumido para 16 nós. Fonte: (ARANHA NETO, 2006).

C.1 Dados do sistema

Tabela C.1: Dados do alimentador real de 16 nós com ramais laterais.

Elemento	No		Resist	Reat	Compr	Pot At	Pot Reat
	Ini	Fin	[ohm/km]	[ohm/km]	[km]	[kW]	[kvar]
1	0	1	0,30	0,42	0,35	48,16	28,58
2	1	2	0,30	0,42	0,54	369,80	219,43
3	2	3	0,30	0,42	0,48	863,66	-687,54
4	3	4	0,30	0,42	0,20	863,66	512,46
5	4	5	0,30	0,42	0,04	169,21	100,40
6	5	6	0,30	0,42	0,86	169,21	-199,60
7	6	7	0,30	0,42	0,22	220,81	131,02
8	7	8	0,30	0,42	0,22	220,81	131,02
9	8	9	0,30	0,42	0,12	418,18	248,13
10	9	10	0,30	0,42	0,21	418,18	248,13
11	10	11	0,60	0,45	0,00	177,16	105,12
12	3	12	0,60	0,45	0,00	19,35	11,48
13	5	13	0,30	0,42	0,00	112,66	66,85
14	7	14	0,30	0,42	0,21	0,00	0,00
15	14	15	0,19	0,40	0,08	2042,50	1211,95
16	10	16	0,60	0,45	0,47	48,38	28,70

Referências Bibliográficas

- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, v. 57, p. 195–204, 2001.
- AL-DABBAGH, M.; AL-DABBAGH, L. Neural networks based algorithm for detecting high impedance faults on power distribution lines. In: IEE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS. Washington DC, 1999. v. 5, p. 3386–3390.
- ALMEIDA, K. C. de. *A general parametric optimal power flow*. Tese — McGill University, Montreal-Canada, November 1994.
- ANEEL. Resolução n.º 456, de 29 de novembro de 2000 publicada em 30 de novembro de 2000, Estabelece, de forma atualizada e consolidada, as condições gerais de fornecimento de energia elétrica. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, v. 138, n. 230-E, p. 35, 2000.
- ANEEL. Capacidade de Geração do Brasil. 2006. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 24 Março 2006.
- ARANHA NETO, E. A. C. *Alocação de Chaves Automatizadas em Redes de Distribuição Utilizando Múltiplos Critérios*. Dissertação — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Maio 2006.
- AURICH, M. R. C. *Um modelo de fluxo de potência ótimo linear com reprogramação corretiva método de pontos interiores*. Dissertação — Universidade Estadual de Campinas., Campinas-SP, Julho 2004.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, April 1989.
- BARKER, P. P.; MELLO, R. W. de. Determining the impact of distributed generation on power systems: Part 1 - radial distribution systems. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2000. IEEE. Seattle, WA, USA, 2000. v. 3, p. 1645–1656.
- BRASIL. Lei nº 8987 de 13 de fevereiro de 1995 publicado em 14 de fevereiro de 1995. Dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, p. 1917, 1995.

- BRASIL. Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, v. 141, n. 146-A, p. 1, 2004.
- BROWN, R. E. et al. Siting distributed generation to defer T&D expansion. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2001 IEEE/PES. Atlanta, GA, USA, 2001. v. 2, p. 622–627.
- BURANI, G. F. et al. O cenário dos recursos energéticos distribuídos no Estado de São Paulo. In: AGRENER GD 5 ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil, 2004.
- CAMILO, L.; CEBRIAN, J. C.; KAGAN n. Impacto da geração distribuída nos consumidores submetidos a variações de tensão de curta duração. In: VI SBQEE SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. Belém-Pará-Brasil, 2005. p. 791–794.
- CAMPOS, F. G. R. de. *Geração de energia a partir de fonte eólica com gerador assíncrono conectado a conversor estático duplo*. Dissertação — Universidade de São Paulo, 2004.
- CARPENTIER, J. Contribution a l'étude de dispatching économique. In: BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS. Paris, 1962. (8, v. 3), p. 431–447.
- CARVALHO, R. J. de O. *Fluxo de Potência Ótimo: Algoritmos de Pontos Interiores, Abordagem Multi-Objetivo e Aplicação de Transformações Ortogonais*. Tese — Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis-SC, Julho 1999.
- CASTRONUOVO, E. D. *Aplicação de Métodos de Pontos Interiores no Fluxo de Potência Ótimo Não-Linear com Utilização de Processamento de Alto Desempenho*. Tese — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Maio 2001.
- CHABU, I. E.; CARDOSO, J. R. O regulador de indução como elemento contribuinte para o aumento da qualidade da energia elétrica em sistemas industriais. In: XVI SNPTTE - SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Brasil, 2001.
- CHEN, T.-H. et al. Distribution system power flow analysis a rigid approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 3, p. 1146–1152, July 1991.
- COLLEGE, P. R. C.; FERREIRA, F.; MEDEIROS, F. Geração distribuída e impacto na qualidade de energia. In: VI SBQEE SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. Belém, Para, Brasil, 2005. p. 781–787.
- COSER, J. *CONTRIBUIÇÕES AOS MÉTODOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO*. Tese — Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis-SC, Fevereiro 2006.
- DALY, P. A.; MORRISON, J. Understanding the potential benefits of distributed generation on power delivery systems. In: RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE. [S.l.], 2001.

- DAS, D.; KOTHARI, D. P.; KALAM, A. Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution systems. *Electr. Power Energy Syst*, v. 17, n. 5, p. 335–346, 1995.
- DINIZ, J. H.; CARVALHO, A. M.; BARROS, D. M. R. Geração distribuída: conceitos, tecnologias e perspectivas. *Eletricidade Moderna*, n. 231, p. 66–79, Abril 2004.
- DPCA. The distributed power coalition of America. 2006. Disponível em: <<http://www-distributedgeneration.com/dpca/what.htm>>. Acesso em: 10 Abril 2006.
- FALCÃO, D. M. *Fluxo de Potência em Redes de Distribuição Radiais*. COPPE-UFRJ: [s.n.], 2003.
- FERNANDES, T. S. P. *Um modelo de despacho ótimo de potência para sistemas multi-usuários*. Tese — Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis-SC, 2004.
- GOMES, P. et al. Geração Distribuída: Vantagens, problemas e perspectivas. In: XV SNPTTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 1999.
- GRANVILLE, S. Optimal reactive power dispatch through interior point methods. In: IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS. [S.l.], 1994. v. 9, p. 136–146.
- ITB. *Regulador de Tensão Monofásico*. Birigüi-SP, Março 2006. Disponível em: <<http://www.itb-ind.br/Manual.pd>>. Acesso em: 30 Julho 2006.
- KARMARKAR, N. A new polynomial time algorithm for linear programming. In: . Springer-Verlag New York, Inc: [s.n.], 1984. p. 302–311.
- KNORR, E.; SPIER, E. B.; LEMOS, F. A. B. Análise da operação isolada de um sistema de distribuição com geração distribuída - o caso Hidropan. In: XV SENDI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Salvador, Bahia, Brasil, 2002.
- KOPCAK, I. *Melhoria das margens de estabilidade de tensão no problema do pré-despacho da operação através de corte mínimo de carga*. Dissertação — Universidade Estadual de Campinas., Campinas-SP, Março 2003.
- LESCANO, G. M. A. *Um modelo de despacho econômico para reservas operativas*. Dissertação — Universidade Estadual de Campinas., Campinas-SP, Agosto 2004.
- LEYDEN. Bancos de capacitores para montagem em poste. 2006. Disponível em: <http://www.leyden.com.ar/bancos_MT_poste.ht>. Acesso em: 30 Julho 2006.
- LOPES, J. A. P. *Avanços em produções distribuída - A experiência Européia*. Abril 2004. Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Porto.
- MAMEDE, J. P. *Previsão de manutenção de disjuntores dos alimentadores de distribuição de energia elétrica pelo método de curto-circuito probabilístico*. Dissertação — Universidade Estadual de Campinas., Campinas-SP, Abril 2004.

- MAMEDE, J. P.; SATO, F. Aplicação de um método probabilístico na programação da manutenção de disjuntores, considerando o efeito das características físicas dos padrões de redes de distribuição. In: III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO. Salvador BA, 2003.
- MARIN, M. A. *Ferramentas de Análise Estática de Redes de Distribuição com a Inserção de Geração Eólica*. Florianópolis-SC: [s.n.], Abril 2004.
- MIKILITA, M. A. S. *Um modelo de Fluxo de Potência Ótimo para minimização do Corte de carga*. Dissertação — Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2005.
- MME. Brasil, ministério de minas e energia, evolução do consumo final energético por fonte, Brasília. 2006. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 24 Março 2006.
- MORETO, M. *Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: Uma metodologia baseada em redes neurais artificiais*. Dissertação — Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Abril 2005.
- NUNES, M. V. A. *Avaliação do Comportamento de Aerogeradores de Velocidade Fixa e Variável Integrados em Redes Elétricas Fracas*. Tese — Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis-SC, 2003.
- PAULILLO, G. et al. Power quality in distributed generation system based on fuel cell technology - a case study. In: IEEE 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER. Lake Placid, NY, 2004. p. 608–612.
- RIBEIRO, P.; FERREIRA, F.; MEDEIROS, F. Geração distribuída e impacto na qualidade de energia. In: VI SBQEE SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. Belém-Pará-Brasil, 2005. p. 781–788.
- RODRÍGUEZ, C. R. C. *Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos conectados à Rede*. Dissertação — Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Julho 2002.
- ROMAGNOLI, H. C. *Identificação de barreiras à geração distribuída no marco regulatório atual do setor elétrico Brasileiro*. Dissertação — Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis-SC, Março 2005.
- SALGADO, R. de S. Método dos Pontos Interiores. Otimização Estática Aplicada a Sistemas de Potência. 2005.
- SHIRMOHAMMADI, D. et al. A compensation based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 2, p. 753–762, May 1988.
- SILVA, J. C. B. et al. *Implantação de sistemas de geração distribuída junto à rede de distribuição*. 2003.

- SIMÕES COSTA, A. *Planejamento da Operação de Sistemas de Energia Elétrica. Parte 02*. Florianópolis-SC, 2005. Especialização em Sistemas de Energia Elétrica.
- SPIER, E. B. et al. Avaliação da conexão de produtores independentes em alimentadores radiais de sistemas de distribuição. In: IV SBQEE SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 2001.
- SPIER, E. B.; LEMOS, F. A. B.; ROSA, M. A. da. Influência de produtores independentes e auto-produtores de energia elétrica no controle de tensão de alimentadores. In: IV SBQEE SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 2001.
- SRINIVAS, M. Distribution load flows: A brief review. In: IEEE PES SUMMER MEETING. Singapore, 2000.
- STEMAC. Grupos geradores. 2006. Disponível em: <<http://www.stemac.com.br/content/produtos>>. Acesso em: 05 Agosto 2006.